

SOMMAIRE

NOMENCLATURE

LISTE DES ABREVIATIONS ET ACRONYMES

LISTE DES FIGURES

LISTE DES TABLEAUX

LISTE DES ANNEXES

INRODUCTION

PREMIERE PARTIE: GENERALITES

 I.1. PROJET PAEAR

 I.2. DESCRIPTION DES TRAVAUX DE FORAGES

DEUXIEME PARTIE : PRESENTATION DE LA REGION MELAKY

 II.1. CONTEXTE ADMINISTRATIF

 II.2. CONTEXTE PHYSIQUE

TROIXIEME PARTIE : ANALYSE ET TRAITEMENT DES DONNEES

 III.1. COUPES DE FORAGE ET COURBES DE POMPAGE

 III.2. RESULTATS DES ANALYSEZS PHYSICO-CHIMIQUES

 III.3. TRAITEMENTS ET INTERPRETATIONS

 III.4. ESSAIS DE REGIONALISATION

CONCLUSION

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES ET WEBOGRAPHIQUES

ANNEXES

NOMENCLATURE

Ca^{2+}	: ion calcium
Cl^-	: ion chlorure
CO_3^{2-}	: ion carbonate
Fe^{2+}	: ion ferreux
Fe^{3+}	: ion ferrique
H^+	: ion hydronium
HCO_3^-	: ion bicarbonate
K^+	: ion potassium
Mg^+	: ion magnésium
Na^+	: ion sodium
NH_4^+	: ion ammonium
NO_2^-	: ion nitrite
NO_3^-	: ion nitrate
OH^-	: ion hydroxyle
Pb^+	: ion plomb
SO_4^{2-}	: ion sulfate

LISTE DES ABREVIATIONS ET ACRONYMES

°C	: Degré Celsius
$\mu\text{S}/\text{cm}^2$: Micro Siemens/centimètre carré
ANDEA	: Autorité Nationale De l'Eau et de l'Assainissement
BAD	: Banque Africaine de Développement
BD500	: Base de Données 1/500 000 ^{ème}
BLU	: Bande Latérale Unique
BDEA	: Base de Données de l'Eau et de l'Assainissement
C	: Crépine
CE	: Conductivité Electrique
CEP	: Cellule d'Exécution du Programme
CGC	: China Géo-engineering Corporation
cm	: Centimètre
DRDR	: Direction Régionale du Développement Rural
ECAR	: Eglise Catholique Apostolique Romane
ESPA	: Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo
FJKM	: Fiagonan'i Jesoa Kristy eto Madagascar
FLM	: Fiagonana Loteriana Malagasy
FTM	: Foibe Taon – tsaritanin'i Madagasikara
G	: Graviers
hab/km ²	: Habitant/kilomètre carré
JIRAMA	: JIro sy RAno Malagasy
Km	: Kilomètre
M	: Mètre
m ³ /h	: Mètre cube par heure
MEM	: Ministère de l'Energie et de Mines
méq/l	: Milliéquivalent par litre
MFT	: Marteau Fond de Trou
mg/l	: Milligramme par litre
MINEAU	: MINistère de l'EAU
mm	: Millimètre
MTR	: Maintirano
NTU :	: Turbidité

NS	: Niveau statique
OMS	: Organisation Mondiale de la Santé
PAEAR	: Programme d'Alimentation en Eau potable et Assainissement en milieu Rural
pH	: Potentiel Hydrogène
PVC	: PolyChlorure de Vinyl
Q	: Débit
S	: Rabattement
SGDM	: Société Géosciences pour le Développement de Madagascar
STM	: Sekoly Technique Mamokatra
TA	: Titre Alcalimétrique simple
TDS	: Total Dissolved Salt
TAC	: Titre Alcalimétrique Complet
TH	: Titre Hydrotimétrique
UNFPA	: Fonds des Nations Unies pour la Population
UNICEF	: Fonds des Nations Unies pour l'Enfance

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Répartition de la superficie par District

Tableau 2 : Liste de communes par Districts

Tableau 3 : Récapitulatif et comparatif des caractéristiques des forages suivant le profil AB

Tableau 4 : Récapitulatif et comparatif des caractéristiques des forages suivant le profil CD

Tableau 5 : Classification des eaux

Tableau 6 : Classification des eaux souterraines par rapport aux résidus sec

Tableau 8 : Classification des eaux souterraines par rapport à la dureté

Tableau 9 : Classification des eaux souterraines par rapport au chlorure

Tableau 10 : Classification des eaux souterraines par rapport au sulfate

Tableau 11 : Grille pour signaler les problèmes d'Azote

Tableau 12 : Les données physiques pour les 29 forages positifs dans la District de Maintirano

Tableau 13 : Les données chimiques pour les 29 forages positifs dans la District de Maintirano

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Carte de localisation de la Région Melaky

Figure 2 : Variation d'altitude pour le District de Maintirano

Figure 3 : Les 3 bandes utilisées pour la composition colorée

Figure 4 : Carte Géologique de Maintirano

Figure 5 : Compositions colorées RGB 321

Figure 6 : Carte structurale de Maintirano

Figure 7: Variation des températures mensuelles maximales et minimales entre 2006 et 2009

Figure 8 : Variation de la précipitation mensuelle entre 2006 et 2009

Figure 9: Carte Hydrologique du District de Maintirano

Figure 10 : Carte d'occupation du sol du District de Maintirano

Figure 11 : Carte de localisation des 29 points de forage positifs dans le District de Maintirano

Figure 12 : Les forages représentatifs suivant le long des deux profils

Figure 13 : Coupe de forage pour le site MTR020

Figure 14 : Variation du niveau dynamique lors de l'essai par pompage pour le site MTR020

Figure 15 : Coupe de forage pour le site MTR021

Figure 16 : Variation du niveau dynamique lors de l'essai par pompage site MTR021

Figure 17 : Coupe de forage pour le site MTR036

Figure 18 : Variation du niveau dynamique lors de l'essai par pompage site MTR036

Figure 19 : Coupe de forage pour le site MTR050

Figure 20: Variation du niveau dynamique lors de l'essai par pompage site MTR050

Figure 21 : Coupe de forage pour le site MTR051

Figure 22 : Variation du niveau dynamique lors de l'essai par pompage site MTR051

Figure 23 : Coupe de forage pour le site MTR018

Figure 24 : Variation du niveau dynamique lors de l'essai par pompage site MTR018

Figure 25 : Coupe de forage pour le site MTR018

Figure 26 : Variation du niveau dynamique lors de l'essai par pompage site MTR018

Figure 27 : Coupe de forage pour le site MTR003

Figure 28 : Variation du niveau dynamique lors de l'essai par pompage site MTR018

Figure 29 : Représentation des teneurs en ions sur le diagramme de Schoëller

Figure 30 : Représentation des teneurs en ions sur le diagramme triangulaire de Piper

Figure 31 : Régionalisation de la conductivité électrique

Figure 32 : Comparaison entre la carte de calcium et magnésium

Figure 33 : Comparaison entre la carte de teneur en ion bicarbonate et celle de magnésium

Figure 34 : Comparaison entre la carte de chlore et sodium

Figure 35 : Variation des niveaux statiques dans le District de Maintirano

LISTE DES ANNEXES

Annexe 1: Normes de potabilité des eaux

Annexe 2 : Normes de potabilité des eaux selon l'OMS

Annexe 3 : Tableau de localisation des 29 forages positifs dans le District de Maintirano

Annexe 4 : Modèle de rapport de chantier par forage

Annexe 5 : Modèle fiche de pompage

Annexe 6 : Modèle fiche d'analyse de JIRAMA

INTRODUCTION

L'accès à l'eau et à l'assainissement pour tous est un enjeu mondial majeur pour la santé publique, l'environnement, la réduction de la pauvreté, l'économie et la dignité humaine. Son insuffisance est la première cause de mortalité au monde.

On estime à 1,1 milliard le nombre de personnes privées d'un accès convenable à l'eau potable et à 2,6 milliards le nombre de personnes qui ne disposent pas de l'assainissement.

A Madagascar, l'accès à l'eau et à l'assainissement demeure l'un des défis majeurs pour le développement du pays. Malgré un environnement politique délicat, de nombreux acteurs continuent de se mobiliser autour des enjeux du secteur, comme en témoigne le succès des espaces de rencontres et d'échanges organisés en 2009 et 2010.

Pour notre pays, de grandes inégalités sont constatées entre les dessertes en eau en milieu rural et urbain, mais également entre les 22 Régions que compte le pays. En 2008, le taux national d'accès à l'eau potable atteint 41 % dont 56% pour les populations urbaines contre près de 34% pour les populations rurales, de grandes disparités subsistent et, malgré une amélioration des conditions d'accès dans le pays (plus de 6% de 2004 à 2008), selon les données fournies par la Base de Données du secteur eau et de l'Assainissement (BDEA), nombreux progrès restent à faire. La grande majorité de la population (69 %) réside en milieu rural et vit dans des conditions souvent difficiles.

En plus, sur la norme de qualité des eaux potables, l'eau destinée à la consommation humaine doit respecter un certain nombre de paramètres qui définissent sa potabilité. Selon l'article 38 du Code de l'eau malagasy, l'eau potable est définie comme étant « une eau destinée à la consommation humaine qui, par traitement ou naturellement, répond à des normes organoleptiques, physico-chimiques, bactériologiques et biologique fixés par décret ». Chaque paramètre ne doit pas dépasser une valeur. Ces paramètres dépendent de la caractéristique des roches aquifères. En effet, la composition chimique des eaux souterraines est majoritairement acquise lors de son passage et de son séjour dans le réservoir. L'eau, au contact de l'encaissant, acquiert une charge minérale caractéristique des roches aquifères. Les éléments qui s'y trouvent en solution sont informatifs sur la nature de l'aquifère traversée.

Pour répondre aux attentes de la population, le Ministère de l'eau a réalisé des projets permettant de faciliter l'accès à l'eau et à l'assainissement convenable dans les zones plus affectées d'accès à l'eau potable par le projet PAEPAR (en 1998) suivit par le projet PAEAR en 2006. On constate que même si on est encore dans une situation difficile à cause de la crise politique depuis février 2009, tous les acteurs du dernier projet cherchent des issues pour que le projet soit achevé.

Pour ce présent mémoire, l'étude se consacre sur la caractérisation hydrogéologique et hydrochimique en choisissant le District de Maintirano dans la Région Melaky, une des zones connecter par le projet de 1250 forages PAEAR.

Cette étude a pour objectif d'avoir des données qualitatives des eaux souterraines du District de Maintirano.

Pour mener à bien notre étude, nous avons adopté le plan suivant :

La première partie se fixera un double objectif, à savoir le projet PAEAR et la description des travaux de forage ;

Dans la deuxième partie, on va décrire la zone d'étude ;

Et la dernière partie, on rentre dans l'analyse et traitement des données.

PREMIERE PARTIE :

GENERALITES

Dans cette première partie, deux sujets sont pris en compte : le projet PAEAR et les travaux de forage.

I.1. LE PROJET PAEAR

Le Projet d'Alimentation en Eau potable et Assainissement en milieu Rural (PAEAR) a débuté en 2006. Le financement de ce projet est assuré par la Banque Africaine de Développement (BAD) et le Gouvernement malgache. Le programme a été lancé afin de contribuer à la réduction de la pauvreté par l'amélioration des conditions de vie de la population à travers la fourniture de services durables d'eau potable et d'assainissement en milieu rural dans la zone d'intervention du projet pour atteindre les objectifs du Millénaire pour le Développement « Réduire de moitié, d'ici 2015, le pourcentage de la population qui n'a pas d'accès à un approvisionnement en eau potable ni à des services d'assainissement de base ».

Autrefois, le PAEAR était sous la tutelle du Ministère de l'Energie et des Mines mais actuellement, il est sous la tutelle du Ministère de l'Eau.

Le programme s'articule autour des trois composantes principales, telles que:

- l'appui institutionnel et les renforcements des capacités ;
- la réhabilitation et le développement des infrastructures d'eau potable et d'assainissement ;
- la gestion du programme.

I.1.1. Les objectifs

➤ Objectif général

- contribuer à la réduction de la pauvreté par l'amélioration des conditions de vie de la population à travers la fourniture de services durables d'eau potable et d'assainissement.

- améliorer l'accès des populations à l'eau potable et à l'assainissement dans les 8 régions concernées du pays (zone Nord : Diana, Sava, Sofia, Betsiboka, Melaky; zone Sud, Atsimo Andrefana, Androy, Anosy).

➤ Objectifs spécifiques

- améliorer le taux d'accès des populations à l'eau potable;
- assurer durablement l'approvisionnement en eau potable et les infrastructures d'assainissement adéquat aux populations rurales ;
- contribuer à l'amélioration des performances des sous secteurs de l'eau potable et de l'assainissement;
- alléger la pénibilité de la corvée de l'eau;
- contribuer à l'éradication des maladies d'origine hydrique.

I.1.2. Les acteurs

Dans l'atteinte des objectifs énoncés précédemment et pour le bon fonctionnement des activités, le Programme entreprend avec divers acteurs techniques et financiers:

- la Cellule d'Exécution du Programme (CEP);

- la Direction de l'Eau Potable et de l'Assainissement (DEPA) assure la mise en application de la Politique Nationale de l'Eau et de l'Assainissement avec ses services techniques;

- l'UNFPA : Fonds des Nations Unies pour la Population a pour mission de renforcer les capacités des Régions et des Districts sanitaires des Régions d'implantation du Programme dans le suivi de la mise en œuvre des activités portant sur la santé et la population;

- l'UNICEF : Fonds de Nations Unies pour l'Enfance qui se charge la production et la diffusion des messages appropriés portant sur l'eau, l'assainissement, la santé, les activités génératrices de revenus et développement.

I.1.3. Le projet PAEAR dans le Nord

Le "Programme Alimentation en Eau et Assainissement en Milieu Rural", PAEAR, est en cours de réalisation dans la partie nord de la Grande Ile, sous la tutelle du ministère de l'eau qui a fait une de ses priorités l'adduction d'eau potable dans les zones rurales pour contribuer au développement national. Le projet PAEAR est présent dans 8 régions de Madagascar dont 5 dans le nord (Diana, Sava, Sofia, Betsiboka, Melaky). Il travaille en partenariat avec deux entreprises spécialisées en détection et forage de puits pour l'adduction d'eau potable, la Reva Forage (malagasy) et le CGC (chinoise).

D'après eux, 250 des 285 forages opérés dans les régions de Diana, Sava, Betsiboka, Sofia et Melaky étaient couronnés de succès (année 2010). Ces sociétés ont pour mission de fournir de l'eau pour 350 bornes fontaines dans la seule partie nord de Madagascar pourtant. Ce qui amène leurs responsables à tirer la sonnette d'alarme sur le retard enregistré pour les déblocages des fonds financés par la Banque Africaine de Développement pour ces opérations (BDEA)

Après avoir vu la description du Projet d'Alimentation en Eau potable et Assainissement en milieu Rural (PAEAR), on va passer à la description des travaux de forages.

I.2. DESCRIPTION DES TRAVAUX DE FORAGES

Concernant la réalisation des 1250 forages positifs du projet PEAR, l'implantation des points de forages étaient chargés par la Société Géosciences pour le Développement de Madagascar (SGDM). Comme méthode, elle adopte l'approche hydrogéologique parfois suivi par la prospection électrique après avoir fait l'étude sur carte (géologique, topographique, hydrologique, aérienne, MNT). Pour la Région Melaky, on n'a fait aucune étude géophysique en implantant les soixantaines points de forage réalisé dans cette zone.

Les exécuteurs qui sont le CGC et REVA FORAGE doivent suivre les procédures déposés par l'Etat représenté par le Ministère de l'Eau et de l'Energie et qu'ils sont signées bien avant. L'objectif est de réaliser 1250 forages positifs équipés de pompes à motrice dans les Régions de DIANA, SAVA, SOFIA, BETSIBOKA, MELAKY.

Sur les sites des travaux de 1250 forages positifs ont été entrepris pour les recherches d'eau souterraine, les travaux seront exécutés dans l'ordre suivant :

- travaux préparatoires ;
- exécution des travaux de forage comprenant les étapes suivantes :
 - installation et décapage de la zone ;
 - forage au rotary et/ou marteau fond de trou (MFT) ;
 - équipement du forage et pose massif filtrant ;
 - développement ;
 - essai de pompage et prélèvement pour analyse ;
 - analyse bactériologique et prélèvement d'échantillon pour analyse physico-chimique (fait par JIRAMA) ;
 - cimentation, construction margelle et aire d'assainissement ;
 - fourniture et pose des pompes à motricité humaine.

Nous allons développer ces différentes étapes pour mieux comprendre la démarche des travaux.

I.2.1. Travaux préparatoires

Les travaux préparatoires qu'ont dus réaliser l'Entrepreneur consistent aux installations et replis de chantier :

- la préparation d'aire de campement de l'entrepreneur ;

- la construction, des aménagements des baraques de chantier, des ateliers, des entrepôts, des logements, bureaux et laboratoires d'Entrepreneur et un bureau mobile ;
- le repli du matériel et engins nécessaires à l'exécution du chantier ;
- l'enlèvement en fin de chantier de tous les matériels, les matériaux en excédent et la remise en état des lieux ;
- les sujétions de maintien de la circulation durant les travaux ;
- l'installation de moyen de liaison téléphonique et/ou par BLU ;
- l'entretien, le nettoyage et l'exploitation des locaux, l'entrepôt et atelier, y compris le gardiennage
- l'amenée du matériel et engins nécessaires à l'exécution du chantier.

Après avoir finir les travaux préparatoires, on passe aux procédés et méthode d'exécution des forages.

I.2.2. Procédés et méthode d'exécution

Pour réaliser les travaux de forages, on utilise des machines sondeuses pour forage mixte rotary-Marteau fond de trou pour forer dans les terrains tendres et durs employant l'eau, l'air, la mousse.

Le forage au MFT du socle cristallin s'effectue après la pose d'un tubage provisoire en acier, au droit des formations d'altérations et solidement ancrés au-dessus du toit du socle dur. Pour traverser les niveaux non consolidés dans les formations du socle, on va procéder à l'injection des boues de forage.

I.2.3. Séquence des opérations

Pour chaque site, on procède aux étapes suivantes :

1^{ère} étape :

L'installation et décapage du point de forage, ces travaux consistent à :

- L'implantation des sites au droit des sites identifiés par l'ingénieur ;
- La préparation site par défrichement et nivellation du terrain ;
- L'enlèvement des fourrées par décapage du terrain ;
- Le déplacement d tous les matériels entre deux point de forage.

2^{ème} étape

L'exécution des forages dont l'enchaînement est comme suit :

- forage en terrains tendres exécuté au ROTARY dont le diamètre est de 10" en taillant avant-trou et 12" tricône pour avant-trou utilisant également l'air comprimé et la boue biodégradable en traversant les formations d'altération jusqu'au toit du socle.

- forage en terrains durs exécuté au MFT dont le diamètre est de 6" 1/2, utilisant une colonne de tubage provisoire en acier de diamètre 179/200 solidement ancré au-dessus du toit du socle avec pénétration de 50cm.

Au prélèvement d'échantillons des « cutting » tous les 1m d'avancement aux changements de nature de formation et au droit des niveaux d'eau et les garderons dans les casiers à l'échantillon pour procéder à une analyse granulométrique, ils porteront le nom du forage et la profondeur du prélèvement.

Lors de la mesure du débit et de la conductivité, dès la rencontre des niveaux aquifères

3^{ème} étape

L'équipement des forages exploitables aussitôt après le forage sur toute sa hauteur par :

- des tuyaux en Poly-Vynil Chloride (PVC). La colonne de tubage sera en colonne unique et comportera :

- une colonne de tubage « plein » ou « aveugle » sur toute la hauteur nécessaire à l'installation de pompe ;
- une colonne de captage constituée de tubes crépinés en face des venus d'eau. La longueur sera déterminée au vu des résultats des forages au maximum 9m ;
- une colonne de base comprenant un élément de décantation à sédiments de 1,5 m de longueur maximum et est obstruée par le sabot de pied.

- la mise en place d'un massif de graviers constitués d'éléments siliceux roulés, tamisés et lavés avec une granulométrie de 2 à 2,5mm ou de 3 à 3,5mm suivant l'indication de l'Ingénieur, dans l'espace annulaire sur toute la hauteur des crépines de plus de 5m, avant extraction progressive de la colonne de tubage provisoire.

- la mise en place d'un tout-venant au-dessus du gravier constitué de sables et d'argiles lavés.

- la cimentation au dessus du tout-venant sur une hauteur de 6m jusqu'au sol avec du ciment.

4^{ème} étape

- Le pré-développement à l' « air lift » pour contrôler le niveau du massif de graviers
- Le remblayage avec tout-venant de l'espace annulaire.
- Le développement du captage dont la séquence est comme suit :

- soufflage intermittent à l'air comprimé avec suivi de la qualité de l'eau, du débit toutes les 5mn jusqu'à l'obtention d'eau claire exempte de sables. On va mesurer la profondeur du forage équipé ainsi que le niveau statique avant et après le développement.
- pompage intermittent à la pompe immergée jusqu'au débit maximal fourni par le forage et la pompe. On suit et note le débit avec le niveau dynamique correspondant. Le développement est fini lorsque la tache de sable reste inférieure à 1cm dans un sceau de 10l et lorsque le débit spécifique n'augmente plus immédiatement après le début d'un pompage. Les dernières mesures débit/ niveau dynamique seront notées pour fixer les débits et le programme du pompage d'essai.

5^{ème} étape

Le pompage d'essai ou l'essai de débit des forages est réalisé à l'aide de la pompe immergée.

L'essai durera cinq (5h) heures et comportera les étapes suivantes :

- premier palier de pompage de 2h avec débit $Q_1=0,7\text{m}^3/\text{h}$
- deuxième palier de pompage de 1h avec un débit $Q_2=70\%$ du débit maximal ;
- troisième palier de pompage de 1h avec un débit $Q_3=\text{débit maximum} ;$
- Une remontée de 1h.

On note les mesures suivantes toutes les minutes pour chaque paliers et pendant la remontée à savoir : le débit, la conductivité, la température, le pH, le niveau dynamique.

Un échantillon d'eau de 3 litres a été prélevé à la fin du pompage d'essai destiné aux analyses bactériologique (1 litres) et physico-chimique (2 litres).

L'interprétation des essais suit la méthode semi-logarithmique de JACOB en prenant compte des pertes de charge et dépendra de l'appréciation de l'Ingénieur.

Toutes les mesures de niveau d'eau ont été effectuées à la sonde électrique et les mesures de débit à l'aide d'un sceau ou bac gradué et un chronomètre.

Une fosse a été construite à quelques mètres du point de forage pour recevoir les eaux provoquées par le soufflage et le pompage du forage pour préserver la propreté de l'alentour mais aussi pour permettre de prendre les différents débits du forage.

6^{ème} étape

Les analyses bactériologiques ont été effectuées tout de suite après prélèvement dans un laboratoire in situ à l'aide d'un kit portable d'analyse. Elles consistent à déterminer le taux de microbes pathogène et micro-organismes par millilitre d'eau.

7^{ème} étape

L'analyse physico-chimique a été confiée au laboratoire de la JIRAMA alors les 29 échantillons d'eaux ont été envoyés à Antananarivo. En principe, l'analyse doit être faite 48h après le prélèvement. Elle consiste à déterminer plusieurs paramètres tels que : l'odeur, la couleur, la température, la turbidité, le pH , la conductivité électrique, la minéralisation, les matières en suspension, la dureté, l'alcalinité, le chlore résiduel, les matières organiques, mais aussi les ions majeurs (cation et anion) qui sont : le calcium, le magnésium, le sodium, le potassium, l'ammonium, le fer, le fer total, le manganèse, l'aluminium, le carbonate, le bicarbonate, le chlorure, le sulfate, le nitrite, le nitrate, le phosphate, le fluorure, l'hydroxyde ainsi que les substances toxiques comme l'arsenic total, le cyanure total et le chrome total. Les résultats obtenus sont ensuite comparés aux valeurs maximales admissibles définies par les normes de potabilité des eaux.

8^{ème} étape

La mise en place de la pompe a été confiée à un organisme tiers ; cette étape ne devrait pas être réalisée si les résultats d'analyses bactériologiques et physico-chimiques ne sont pas conformes à la norme.

DEXIEME PARTIE :

PRESENTATION DE LA REGION MELAKY

Pour la description du contexte général de la zone d'étude, on va considérer deux aspects : administratif et physique.

II.1. CONTEXTE ADMINISTRATIF

Dans ce paragraphe, nous allons voir le contexte territorial ou géographique, puis, le contexte socio-économique.

II.1.1. Contexte géographique

La Région Melaky se trouve dans la partie Centrale Ouest de Madagascar. Elle se localise entre les coordonnées Laborde suivantes :

X= 100 000 m et 350 000 m

Y= 700 000 m et 1 120 000 m.

Cette région est administrativement limitée au Nord par les Districts de Soalala et d'Ambato-Boeni au Sud par les districts de Belo-sur-Tsiribihina et Morondava, à l'Est par les Districts de Fenoarivobe et d'Ankazobe et à l'Ouest par le Canal de Mozambique.

La région Melaky comprend les Districts de Besalampy, d'Ambatomainty, d'Antsalova, de Morafenobe et de Maintirano.

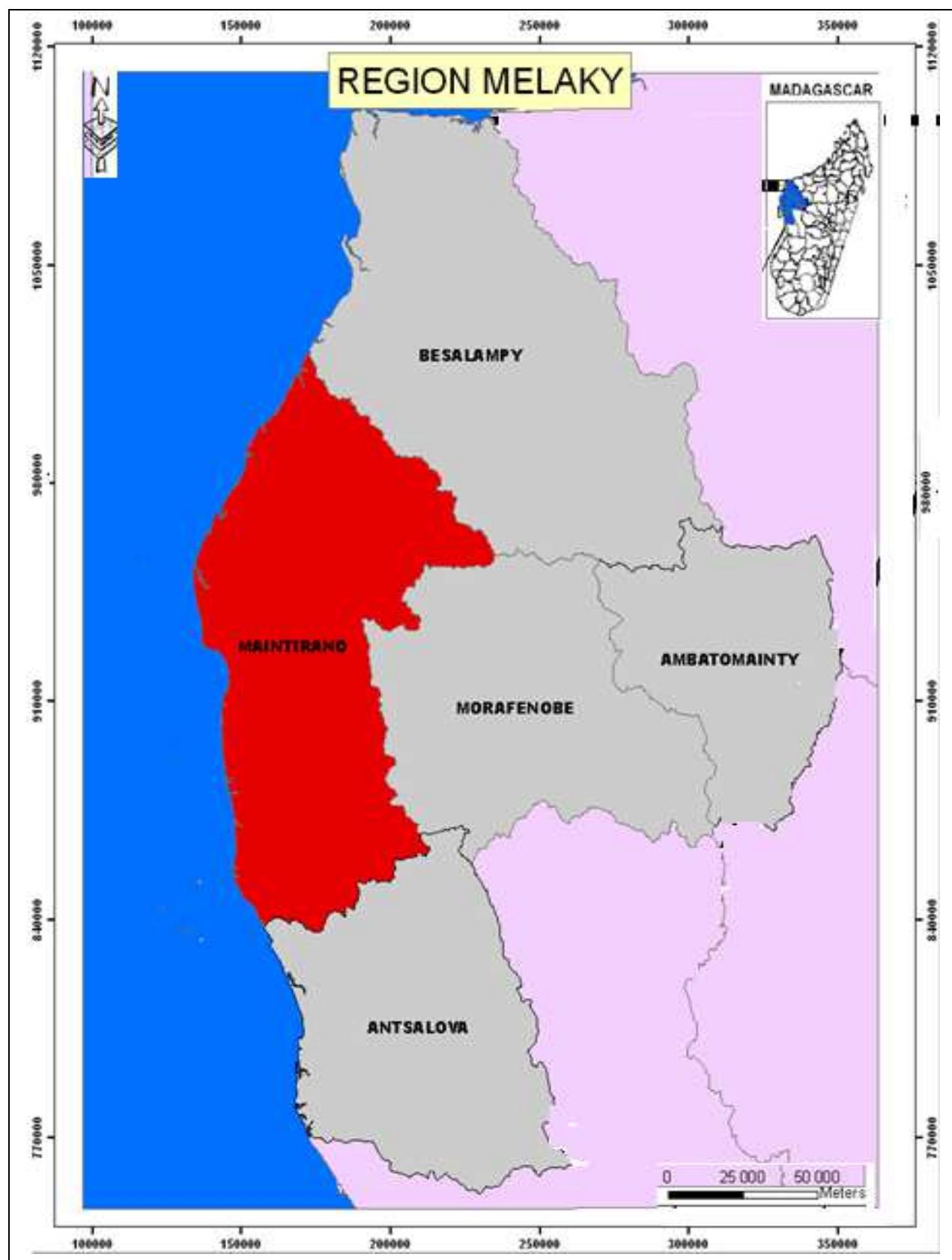


Figure 1 : Carte de localisation de la Région Melaky

La Région s'étendant sur une superficie de 38852 km², occupant ainsi 6,6% du territoire national, elle regroupe les sous-préfectures de Maintirano, d'Antsalova, de Morafenobe, d'Ambatomainty et de Besalampy.

Cette superficie se repartit comme nous voyons dans le tableau ci-dessous (Tableau 1).

Tableau 1 : Répartition de la superficie par District

Districts	Maintirano	Antsalova	Morafenobe	Ambatomainty	Besalampy
Superficie (km ²)	9456	6097	8215	3792	11292
Pourcentage	24,33	15,69	21,14	9,76	29,06

Source : Monographie de la Région Melaky

Les Districts de Maintirano, Antsalova, Morafenobe et Ambatomainty occupent presque la totalité de la région. La superficie de Besalampy représente 9,76% de celle de l'ensemble du territoire.

La Région s'ouvre largement dans sa partie occidentale sur le Canal de Mozambique, là où sont réunis toutes les conditions favorables au développement des activités en mer notamment la pêche et le transport maritime.

La Région de Melaky est administrativement composée de 27 Communes dont 5 Urbaines et 22 rurales.

La répartition des communes par Districts est présentée ci-après (Tableau 2).

Tableau 2 : Liste de communes par Districts

District	Maintirano	Antsalova	Morafenobe	Ambatomainty	Besalampy
Communes	Maintirano	Antsalova	Beravina	Ambatomainty	Besalampy
	Belitsaka	Sahoany	Andramy	Sarondrano	Marovoay
	Mahafahijifo	Masoarivo		Marotsialeha	Soanianga
	Andrea	Trangahihy			Bekodoka
	Betanatanana	Bekopaky			Mahabe
	Antsondradava				Ankasakaasa
	Ankisatra				Tsibiray
	Andabotoka				Ambonidiatsimo
	Marohazo				

Source : Monographie de la Région Melaky

II.1.2. Contexte socio-économique

II.1.2.1. *Milieu humain*

La répartition spatiale de la population dans la Région du Melaky n'est pas homogène et sa composition varie en fonction de ses activités et des facteurs sociaux existants.

Population urbaine et population rurale

La majeure partie de la population habite en milieu rural. Maintirano, qui est le Chef -lieu de la Région est la seule vraie ville.

Il y a une forte concentration urbaine dans la sous-préfecture d'Ambatomainty. Ceci est dû à l'insécurité dans le milieu rural en plus de l'enclavement et l'insuffisance de service de sécurité. Les taux d'urbanisation dans les sous-préfectures de Maintirano et d'Antsalova sont influencés par la prolifération du travail informel attirant notamment les jeunes et d'autres secteurs (administration ...).

Composition ethnique

La population est cosmopolite. En général, les Sakalava sont majoritaires dans la région.

Cependant, on y trouve d'autres franges telles que les Antaisaka, Betsileo, Bara, Tsimihety, Antandroy et Merina.

Les Sakalava pratiquent les activités pastorales. Attirés par l'épanouissement du marché de bovidé et habitués à la pratique de l'agriculture, les Antaisaka, Betsileo et Merina qui sont des migrants occupent les basses plaines propices à la riziculture. Certains d'entre eux pratiquent la pêche et le commerce en association avec les indo-pakistanais. Les chinois sont attirés par le secteur pêche surtout dans la sous-préfecture de Maintirano.

II.1.2.2. *Niveau d'instruction*

Le niveau d'instruction de la population caractérise la capacité de celle-ci à se développer. Le taux de scolarisation est très faible et remarquablement homogène. S'agit-il d'une désaffection générale des populations du Melaky pour l'école.

II.1.2.3. *Services sociaux*

- Infrastructures socioculturelles

Les activités socio- culturelles sont pratiquées au niveau des associations (interethnique, politique, religieuse, sportive) de l'alliance française, du centre culturel musulman, du télé-enseignement.

On trouve des terrains de sport dans toutes les sous-préfectures et dans quelques chefs lieux de commune.

La région ne possède qu'une salle d'œuvre catholique à Besalampy. Chaque Chef lieu de sous-

préfecture possède des tronom-pokonolona.

Maintirano et Antsalova possèdent de bibliothèque de l'alliance française.

- Religion

Trois principales religions sont pratiquées dans la région. Dans la majeure partie la culte traditionnelle occupe le premier rang, suivi par la religion chrétienne (Catholique, Luthérienne, FJKM, Anglican, Adventiste, Jesosy Mamonjy, Pentecôtiste, Ara-pilazantsara, Témoins de Jéhovah, etc.), et la religion musulmane.

Quelques églises chrétiennes prennent part à l'activité du développement rural et à la santé communautaire telles que:

- l'E.C.A.R : Sekoly Technique Mamokatra (STM) et dispensaire dans chaque lieu de Sous-préfectures
- F.L.M : (Fanentanana, Fambolena, Fiompiana (FA.FA.FI) dispensaire à Antsalova
- FJKM: Sampan'Asa Fampandrosoana (SAF FJKM) à Ambatomainty
- Secteur Economique

II.1.2.4. Secteur agricole

Le secteur agricole comprend les activités de cueillettes (celles liés directement à l'exploitation des Ressources Naturelles), l'agriculture, la pêche et l'élevage. Ces activités se cantonnent en général dans le secteur primaire.

- Agriculture
- Caractéristique globale

La Région de Melaky possède un potentiel agronomique important avec une vaste étendue de terrains agricoles. La présence de type de sols fertilisant donne lieu à l'existence d'une diversité de cultures aussi bien vivrières qu'industrielles sur d'immenses plaines alluviales, des Baiboho et des bas fonds inondables.

Ces plaines sont très importantes dans les sous-préfectures riveraines de la côte Ouest à savoir Besalampy, Maintirano et Antsalova.

On constate que cette situation est marquante dans les zones ou sous-préfectures à vocation agricole. Dans les sous-préfectures d'Ambatomainty, Maintirano, Besalampy la superficie cultivée est faible, ce sont des zones à vocation pastorale.

- Type de culture

Les cultures vivrières sont pratiquées primordialement, suivies des cultures industrielles et des cultures fruitières.

On ne trouve pas de cultures de rente dans la région car les conditions climatiques ne s'y prêtent

pas.

- Production

Le riz constitue la principale spéculation dans cette région. Cette culture est surtout pratiquée dans les sous-préfectures d'Ambatomainty, Besalampy et Maintirano où elle constitue un des principaux aliments de la population.

Les cultures vivrières sont pratiquées en deux saisons: « ASARA » et « JEBY ».

La patate douce, le haricot et le pois de cap se font notamment en « JEBY ». Le riz occupe le premier rang dans la région, (pour le District de Besalampy, de Maintirano, d'Antsalova et de Morafenobe. Quant à Ambatomainty, la superficie cultivée est légèrement dépassée par le manioc.

Les potentialités rizicoles de la région sont très importantes dans la plaine de Bemamba, Antsalova, plaine de Behoria et Betanatanana, Maintirano et les plaines de Besalampy.

Elles assurent l'autosuffisance de la région en paddy, malgré l'insuffisance de l'irrigation. Chaque année, une partie de reproduction est exportée au nord et au sud de la région, mais cela ne pose pas de problèmes de ravitaillement interne.

Après le contexte administratif, on passe au contexte physique de la Région Melaky.

II.2. CONTEXTE PHYSIQUE

C'est dans cette partie que nous allons décrire le relief et le paysage, la géologie, le climat, l'hydrologie et aussi le sol et la végétation. Toutes ces informations sont vraiment importantes dans notre étude pour avoir un bon résultat.

II.2.1. Relief et paysage

En général, le Centre Ouest se distingue nettement du reste du pays par ses caractères physiques. De l'intérieur vers la côte se distingue un vaste plateau qui s'abaisse doucement en plaine côtière sur le littoral.

II.2.1.1. Les plateaux

Le plateau calcaire de Bongolava s'étend sur une vaste superficie de part et d'autre du promontoire de l'Ambongo s'ouvrent les 2 bassins sédimentaires du Menabe et du Boina. Dans cette région, le phénomène érosif y est très intense à cause de la tectonique.

En effet, l'érosion sélective de réseau hydrographique a dessiné un relief caractéristique de cuesta et de plateaux alternant avec des dépressions disposées en auréoles concentriques.

II.2.1.2. La zone littorale

La région dispose d'une côte d'environ 350 km de longueur riche en ressources côtières et marines. Deux ensembles de bassins fluviaux encadrent le littoral :

- au Sud, le bassin de Manambolo (13970 km²) ;
- au Nord, le bassin de la Mahavavy (16475 km²).

Des formations très larges de mangroves occupent la côte allant du Cap Saint André à la limite sud du district.

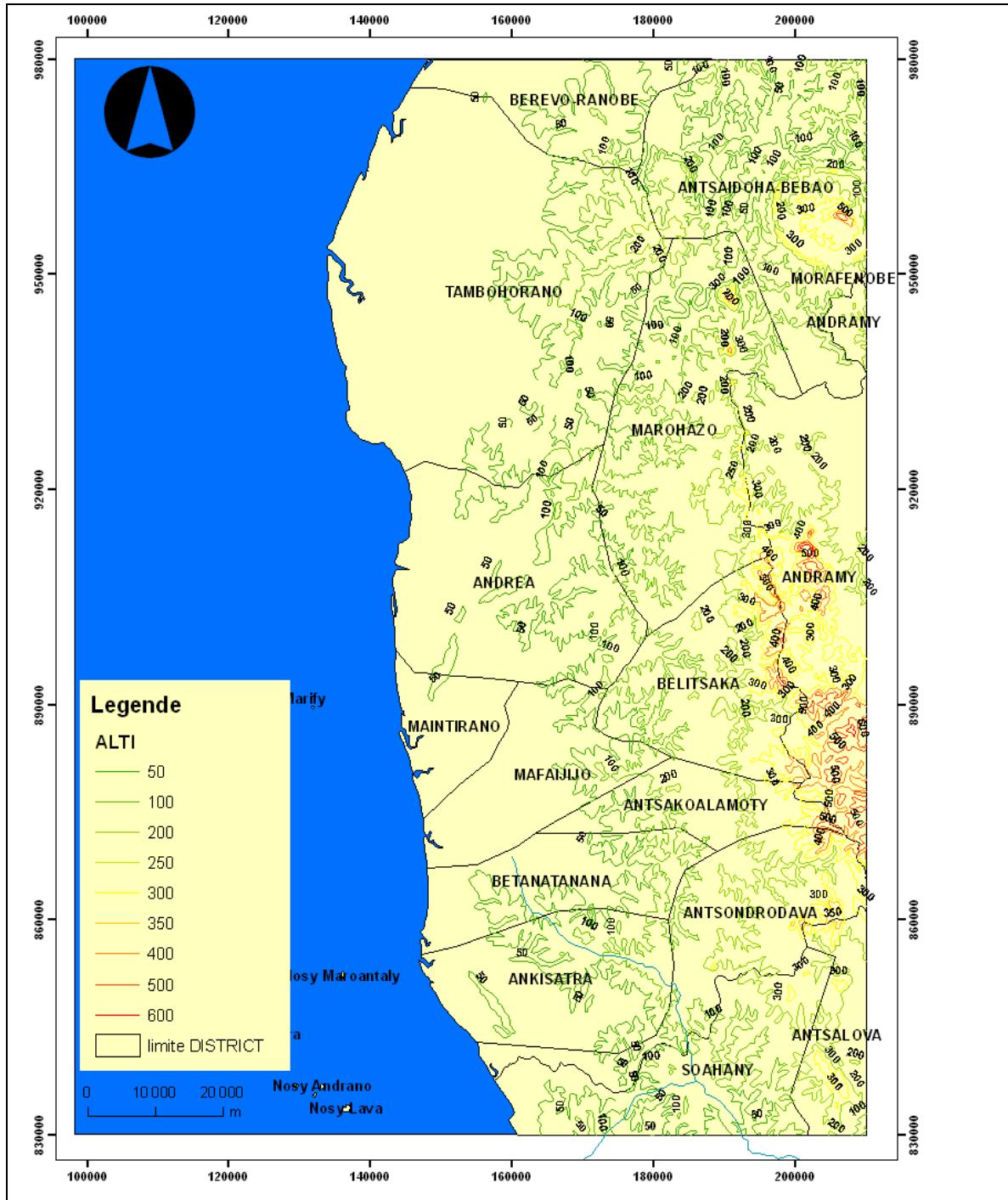


Figure .2 : Variation d'altitude pour le District de Maintirano

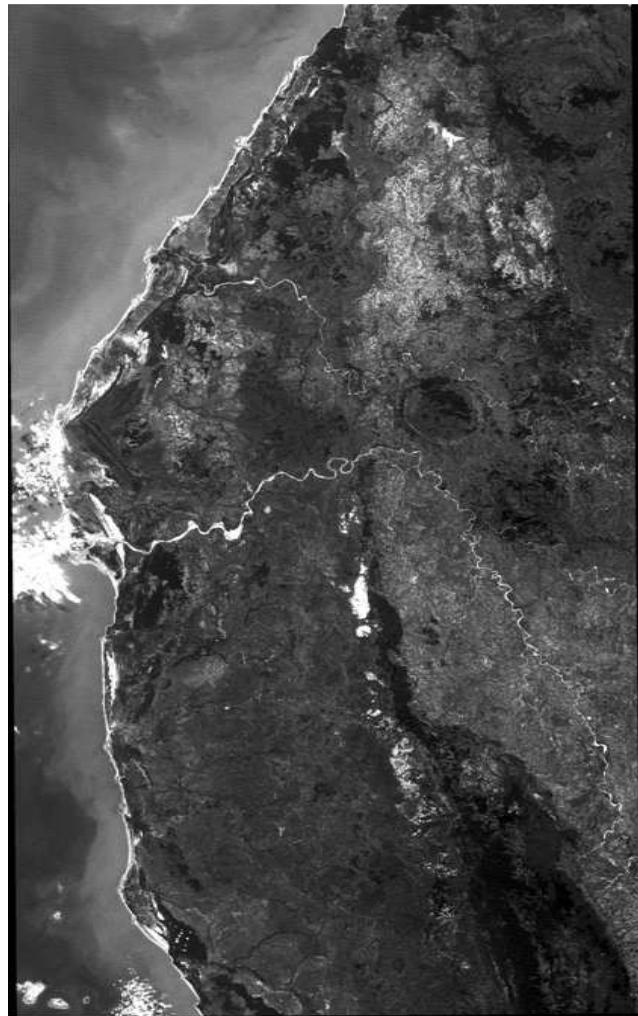
II.2.2. Géologie et les traits structuraux

Géologiquement, la Région Melaky fait partie du bassin sédimentaire de Morondava. La zone sédimentaire repose sur le socle. Dans la majeure partie de la Région, notamment les sous-préfectures de Morafenobe et d'Ambatomainty et la partie Ouest de la sous-préfecture de Besalampy, est constituée par des formations géologiques anciennes composée par des KARROO d'Isalo et de Sakamena, de la Gabbros, de la granite et de la migmatite (migmatite de Tampoketsa).

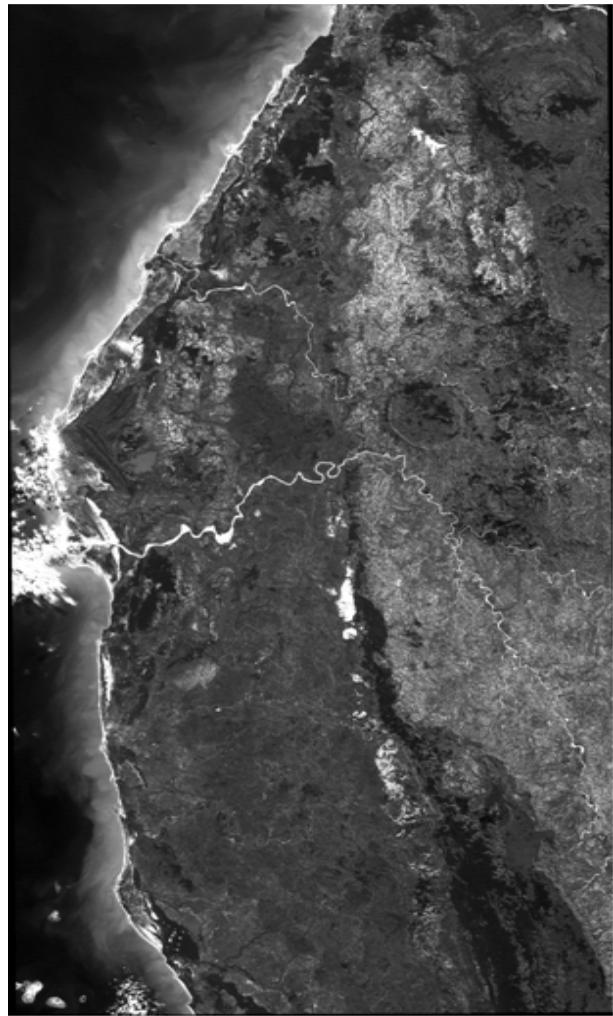
Sur le littoral, on trouve l'alternance de miocène marin, d'alluvions de sable et de pliocène continentale. Ils sont précédés par des sols nummulitiques (au Nord Est de Maintirano), et des sols volcaniques crétacés. On y rencontre aussi de sol jurassique.

Les traits tectoniques ont pu ressorti par l'application de la technique de la télédétection, en faisant les combinaisons colorées à partir des images satellites avec les bandes TM3, TM2, TM1. Pour cette zone, elle est couverte par l'image Landsat ETM n°161 072 pour la partie supérieure et 161 073 pour la partie inférieure.

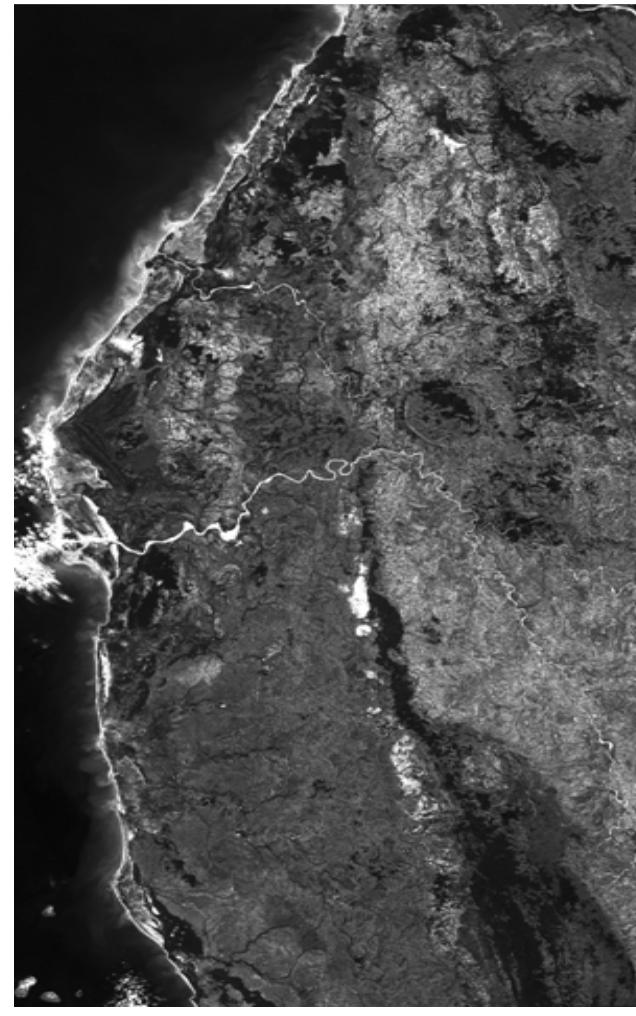
L'image obtenue à l'aide des compositions colorées (figure n°3) et la géologie de la région qui nous permettent de localiser et d'extraire des traits structuraux en adoptant le logiciel du SIG.



Bande TM 3



Bande TM 2



Bande TM 1

Figure 3 : Les 3 bandes utilisées pour la composition colorée

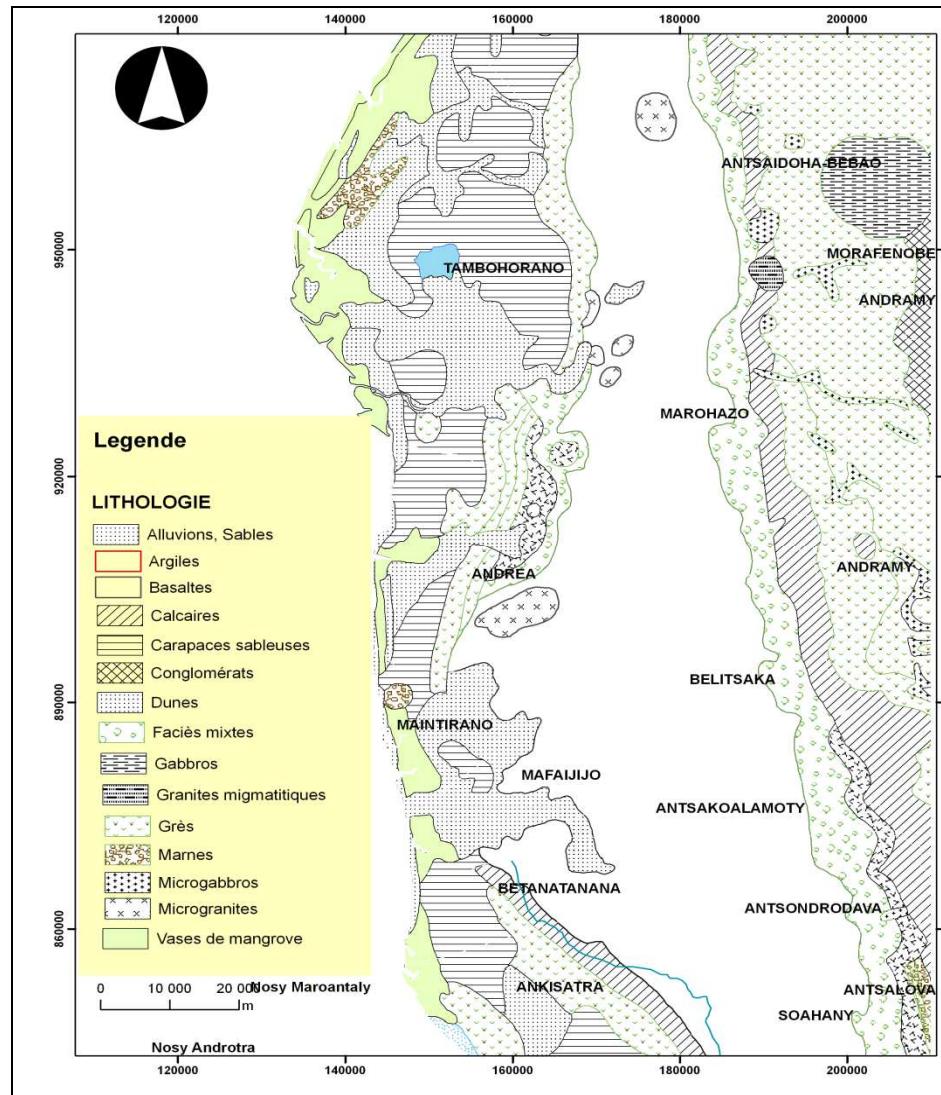


Figure 4 : Carte Géologique de Maintirano

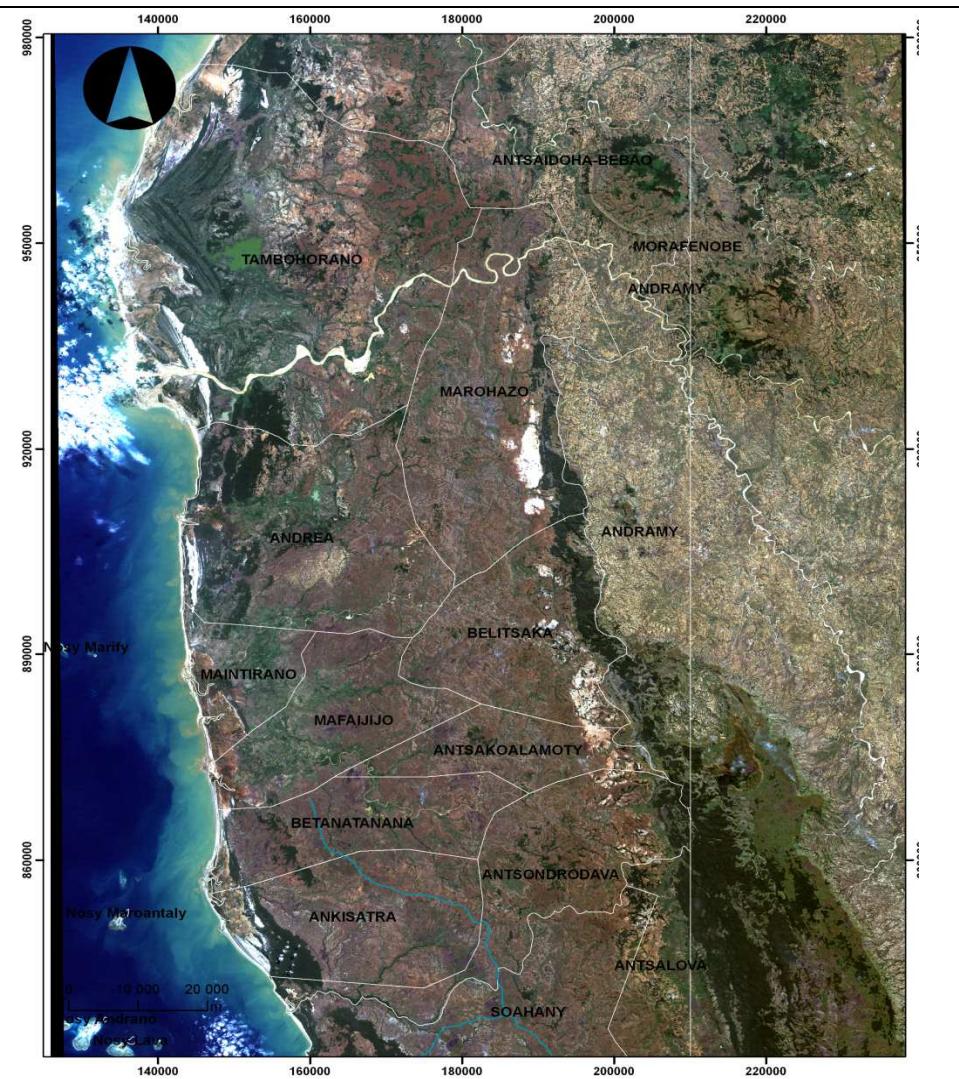


Figure 5 : Compositions colorées RGB 321

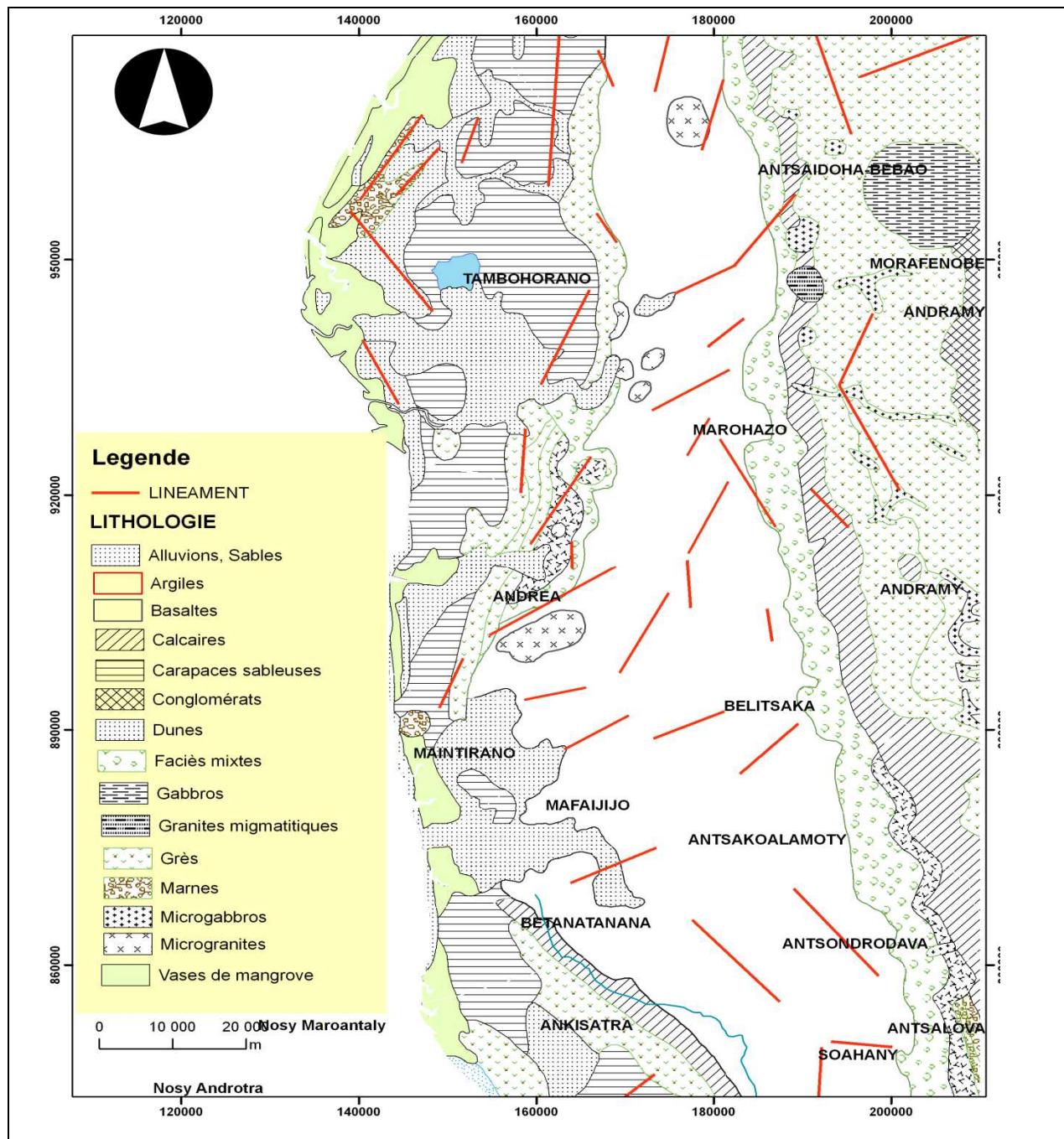


Figure 6 : Carte structurale de Maintirano

II.2.3. Climat

Le climat est de type tropical chaud et sec caractérisé par deux saisons distinctes : saison sèche, de novembre à mars et saison des pluies d'avril en octobre.

II.2.3.1. Température

Il s'agit d'une région chaude; la température est en général élevée pour toute la région ($T_{max}=31,3^{\circ}C$).

Les températures les plus élevées correspondent à la période pluvieuse la plus intense. C'est la période active des cultures pluviales annuelles.

L'amplitude thermique relativement élevée permet la pratique de l'agriculture avec une bonne quantité de pluies.

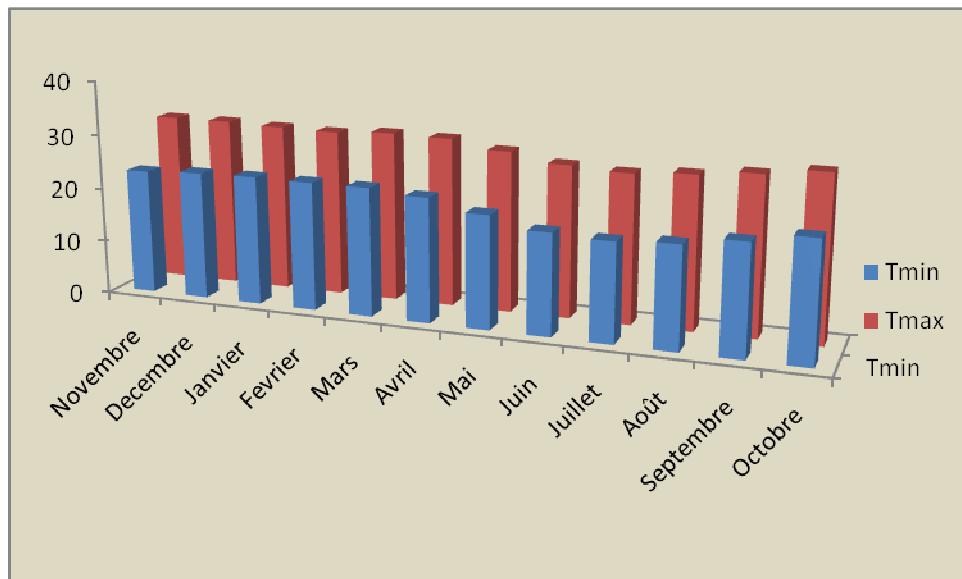


Figure 7: Variation des températures mensuelles maximales et minimales entre 2006 et 2009.

Source : Station météorologique d'Ampandrianomby, année 2004 à 2009

II.2.3.2. Pluviométrie

Cette zone appartient au domaine tropical sub à semi- humide chaud de basse et moyenne altitude dont les précipitations annuelles varient entre 600 mm exclus et 1.200 mm inclus.

La saison de pluie est concentrée sur environ 5 mois de novembre à mars dans les meilleures conditions.

Le régime pluviométrique dans la Région Melaky est très aléatoire et mal répartie durant l'année comme le montre la figure ci-après :

La pluviométrie est un facteur déterminant du rendement agricole et des productions halieutiques.

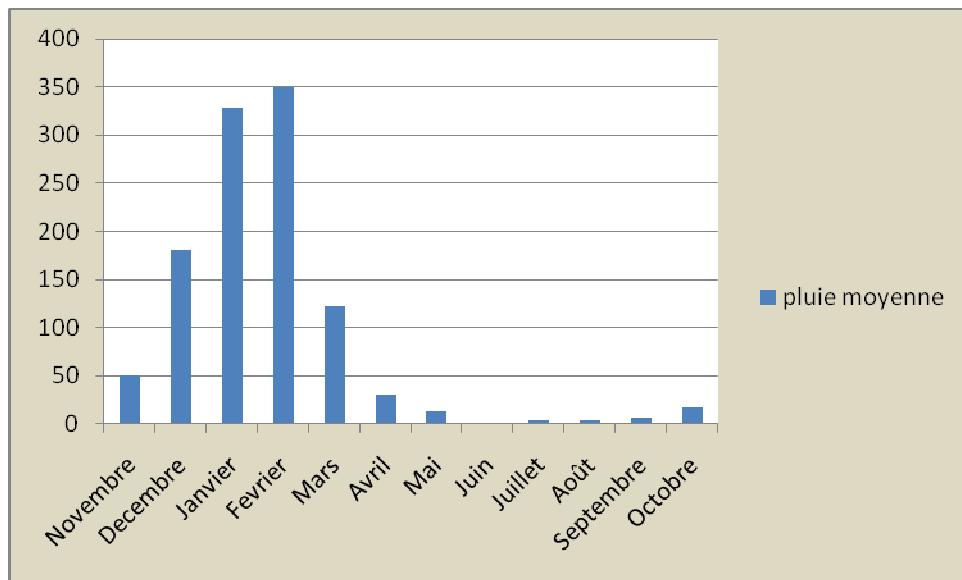


Figure 8 : Variation de la précipitation mensuelle entre 2006 et 2009

Source : Station météorologique d'Ampandrianomby, année 2004 à 2009

II.2.3.3. Vent

La Région du Melaky se situe dans le « domaine sous le vent ». Le vent souffle d'Est en Ouest d'avril en septembre avec une vitesse atteignant 30 à 35 km par heure.

II.2.4. Hydrologie

La Région du Melaky est très riche en cours d'eau. Le régime hydrologique y est bien soutenu durant toute l'année.

La disponibilité (disposition) en eau en permanence est un atout crucial pour dynamiser de nombreuses activités socio-économiques telles que ; le transport fluvial et maritime, l'adduction (alimentation) d'eau des communautés locales, la pêche et l'agriculture.

Pour le District de Maintirano, on a sept (07) principaux cours d'eau qui sont : Namela, Kimazimazy, Demoka, Manombo, Manambaho, Marifolahy, Ranobe et Kingalahy.

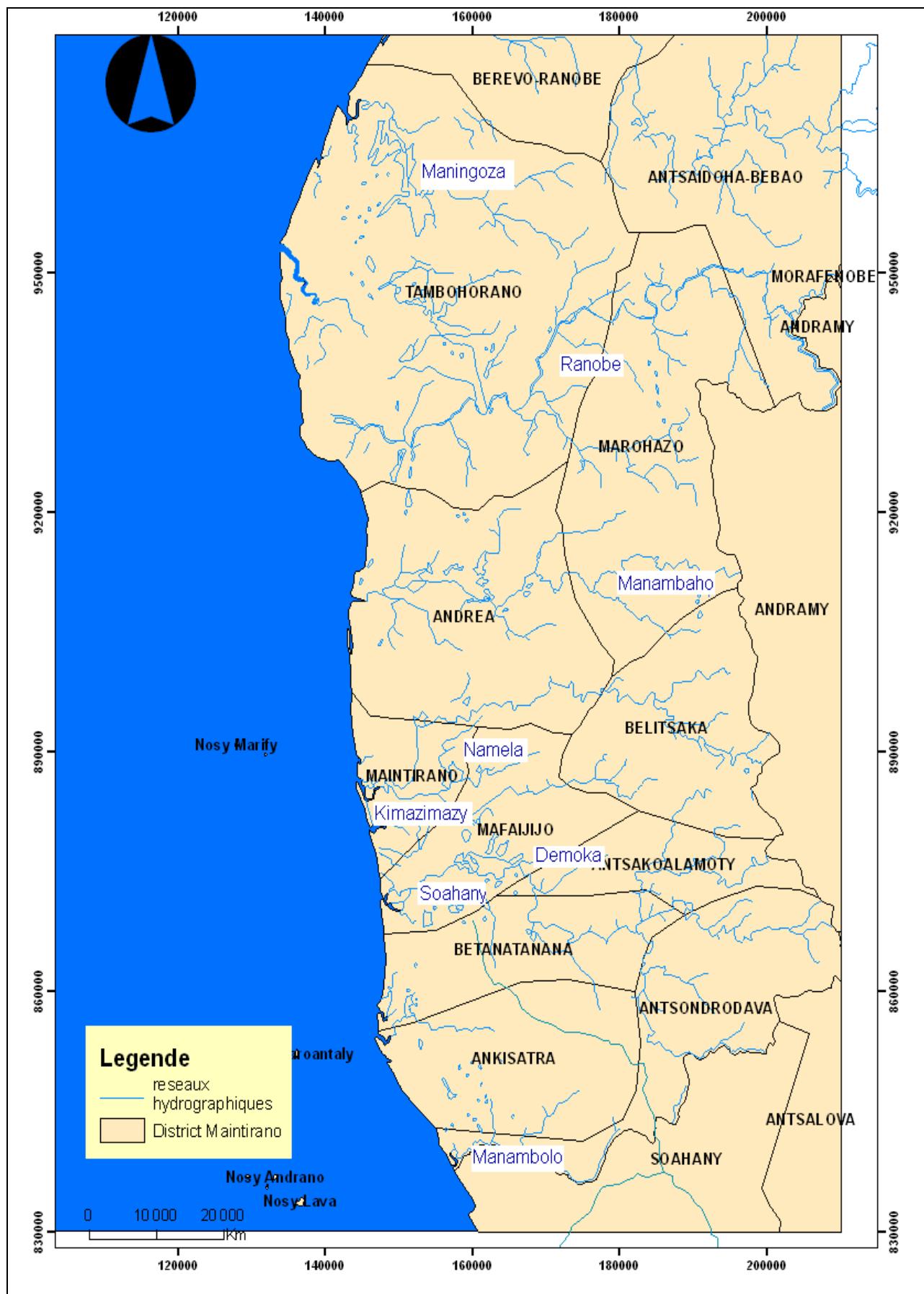


Figure 9: Carte Hydrologique du District de Maintirano

Outre les fleuves et rivières qui caractérisent la région, il faut noter aussi la présence de nombreux lacs et étangs qui offrent de potentiels économiques non négligeables : pêche, tourisme...

II.2.5. Sols et végétations

Les types de sol et le couvert végétal sont importants au fonctionnement hydrologique mais aussi à la recharge de la nappe souterraine.

II.2.5.1. Sols

De part sa situation géographique, la région est vouée aux types de sols variés à savoir : la plaine côtière est formée de terrasses inondables à sols limoneux, ou sablo-limoneux et s'achève par la formation de mangrove sur le littoral. La texture devient sableuse au niveau des cordons littoraux favorisant la plantation des cocotiers ; les sols hydromorphes aux apports d'alluvions siliceux, riches en élément fertilisant sont très propices à la riziculture. La plaine est favorisée par l'existence des fleuves qui arrosent et déposent des alluvions pendant la saison des crues rendant les dépressions fertiles. Les plateaux calcaires comportent les sols ferrugineux tropicaux brins rouge. Les réserves en éléments fertilisant de ces unités sont faibles à cause de l'importance de l'érosion différentielle accélérée et le passage répété de feux de brousse. Ils constituent néanmoins des pâturages naturels de plus en plus maigres.

II.2.5.2. Végétations

La couverture végétale est formée essentiellement par :

des forêts caducifoliées à l'Ouest sur le plateau calcaire et gréseux, et qui est malheureusement en train de dégradation à cause du passage répété de feux de brousse
des savanes herbeuses des pseudo-steppes sur les glaces des plateaux basaltiques
des forêts galeries dans les vallons disséqués par le réseau hydrographique
des forêts de palétuviers dans les mangroves sur le littoral

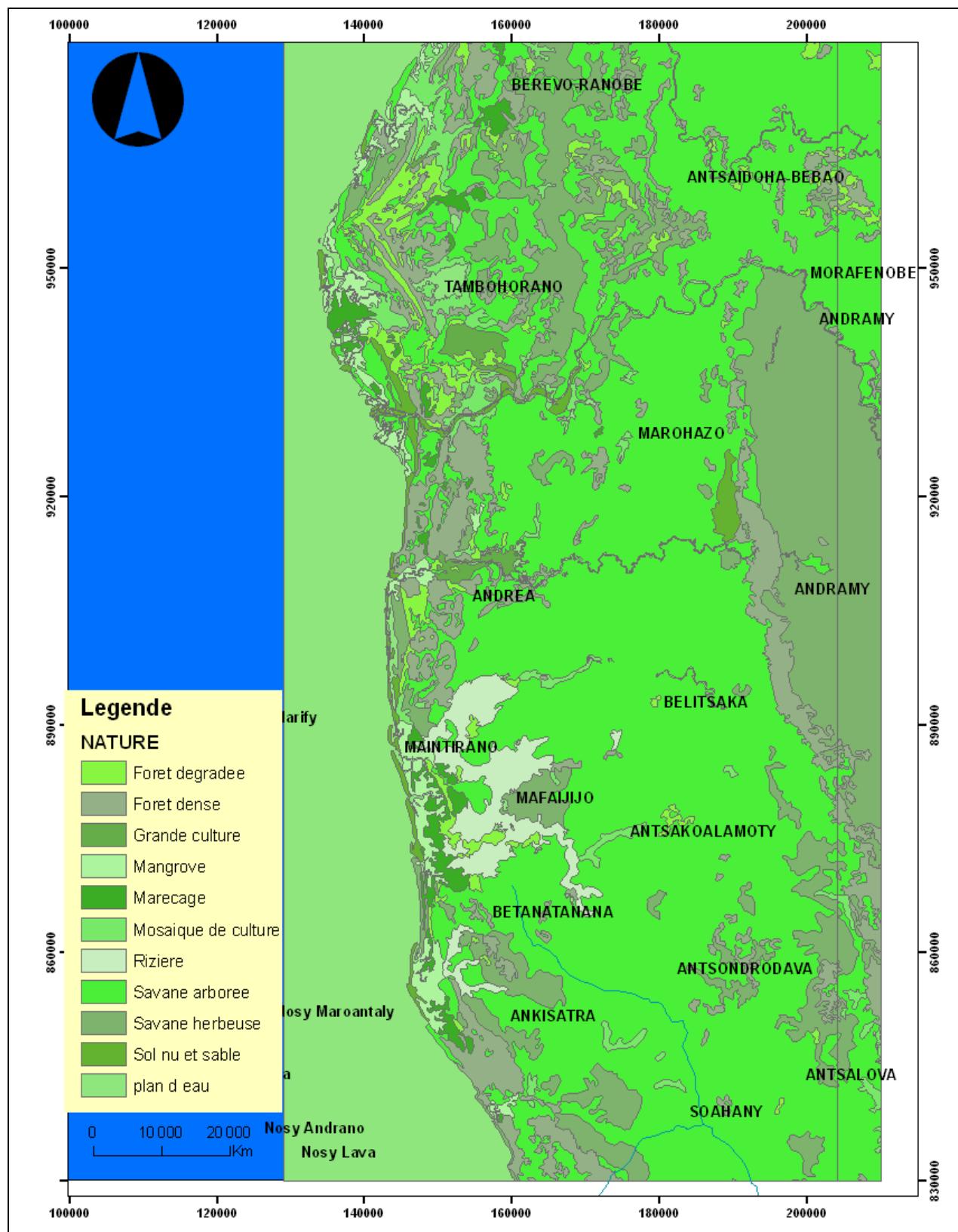


Figure 10 : Carte d'occupation du sol du District de Maintirano

TROISIEME PARTIE :

**ANALYSES
ET
TRAITEMENTS
DES
DONNEES**

Dans cette partie, on va diviser en quatre catégories l'interprétation des données de forages

- les coupes de forage avec les courbes de pompage
- les résultats de l'analyse physico-chimique fait par le JIRAMA
- le traitement et l'interprétation
- l'essai de régionalisation

III.1. COUPES DE FORAGE ET COURBE DE POMPAGE

Lors de l'exécution des travaux de forage, une fiche doit être remplie par l'hydrogéologue pour chaque point d'implantation et qui décrit le déroulement des travaux (date d'exécution, coordonnées du point de forage, le technique et outils utilisés, ...), les caractéristiques de trou de forages tels que la localisation, la profondeur du forage, la lithologie, le diamètre de trou, le débit ainsi que la conductivité de l'eau pour chaque venue d'eau. Cette fiche doit être aussi signée par le représentant de l'entreprise et celui du bureau d'étude.

Ce sont ces données contrôlées que nous avons utilisées pour notre étude. Les 29 points de forages sont localisés sur la carte suivante (figure 11).

Pour l'essai par pompage, il existe deux types ; le pompage d'essai et l'essai de puits. Lors de la réalisation de ce projet on adopte ce dernier type.

Par définition, l'essai de puits est un test paliers de débit constant de courtes durées avec mesures du niveau du plan dans le forage.

Pour l'exécution de l'essai de puits ; tout d'abord, on enlève l'effet de la capacité du puits (vidange de l'ouvrage). Puis, on passe directement à la réalisation de(s) palier(s) qui dure au total quatre (04) heures en mesurant les rabattements en mètre et à la fin de chaque palier et le débit de pompage qui doit être constant durant un palier. (On utilise comme débit initial la puissance minimale de la pompe puis on augmente le débit suivant une progression de 2, 3, 4). Et enfin, on arrête le pompage d'une durée permettant la remontée du niveau d'eau et la mesure du rabattement résiduel.

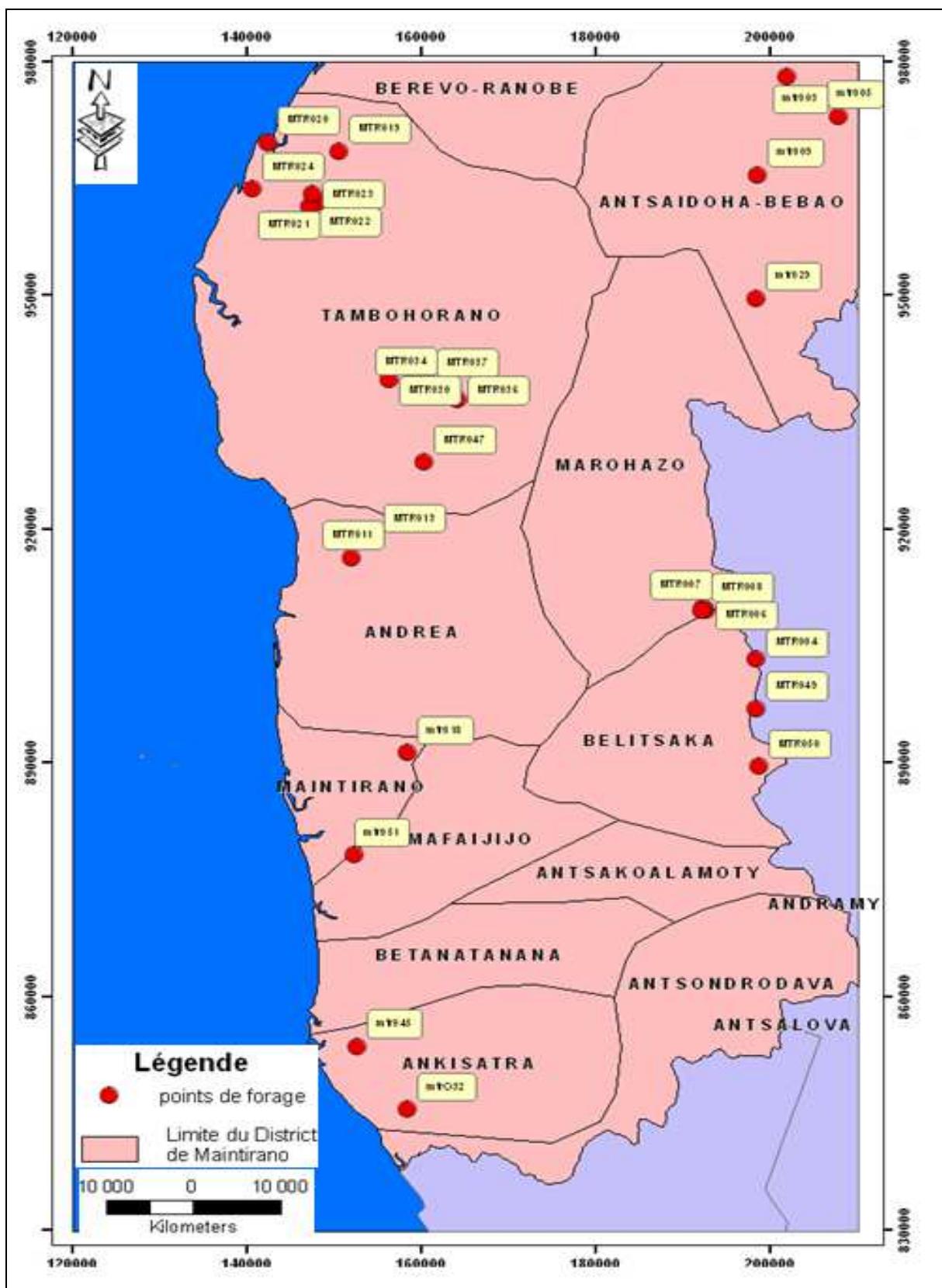


Figure 11 : Carte de localisation des 29 points de forage positifs dans le District de Maintirano

Pour l'interprétation, on va choisir deux profils notés AB suivant une direction Nord-Ouest vers Sud-est et CD de direction Ouest-Sud-ouest/ Est-Nord-est (cf. : figure 12).

Les points de forages traversés par les deux profils sont considérés comme points représentatifs dans cette étude.

Suivant le profil AB, les points de forages sont au nombre de sept (07) : MTR020, MTR021, MTR027 et MTR050 de même pour le profil CD quatre (04) points sont traversés : MTR051, MTR018, MTR003 et enfin MTR009.

Interprétations des coupes de forage et des courbes de pompage

Le principe pour l'interprétation est de faire des comparaisons des différents paramètres (physiques et chimiques) entre les points de forage le long des profils (tableau 3).

Il existe deux types d'essai par pompage : le pompage d'essai et l'essai de puits. Pour ce projet, on a réalisé ce dernier type. Par définition, l'essai de puits est un test par palier de débit constant de courtes durées avec mesures du niveau du plan d'eau dans le forage.

Pour l'exécution, on enlève d'abord l'effet de la capacité du puits pour effacer l'effet de capacité du forage.

En réalisant des paliers de débit à débit constant pendant une courte durée de 4h, on mesure, les rabattements en mètre, mesuré en fin des paliers et le débit Q constant en m^3/h .

Après le pompage on a pris 1h de temps pour que le niveau d'eau remonte.

On utilise comme débit initial (pour le premier palier) la puissance minimale de la pompe puis on augmente le débit suivant une progression de 2, 3 ou 4. Le premier débit ($Q1$) du 1^{er} palier durant deux heures (2h) de temps, puis on enchaîne avec le deuxième débit ($Q2$) du 2^{ème} palier et ensuite on enchaîne avec le troisième débit ($Q3$) du 3^{ème} palier. Dans le cas où le débit du site est faible, on fait le pompage à un seul palier pendant quatre (4h) de temps.

A l'arrêt du pompage, on chronomètre le temps de remontée et on mesure le niveau dynamique de l'eau dans l'ouvrage pendant une heure (1h) de temps.

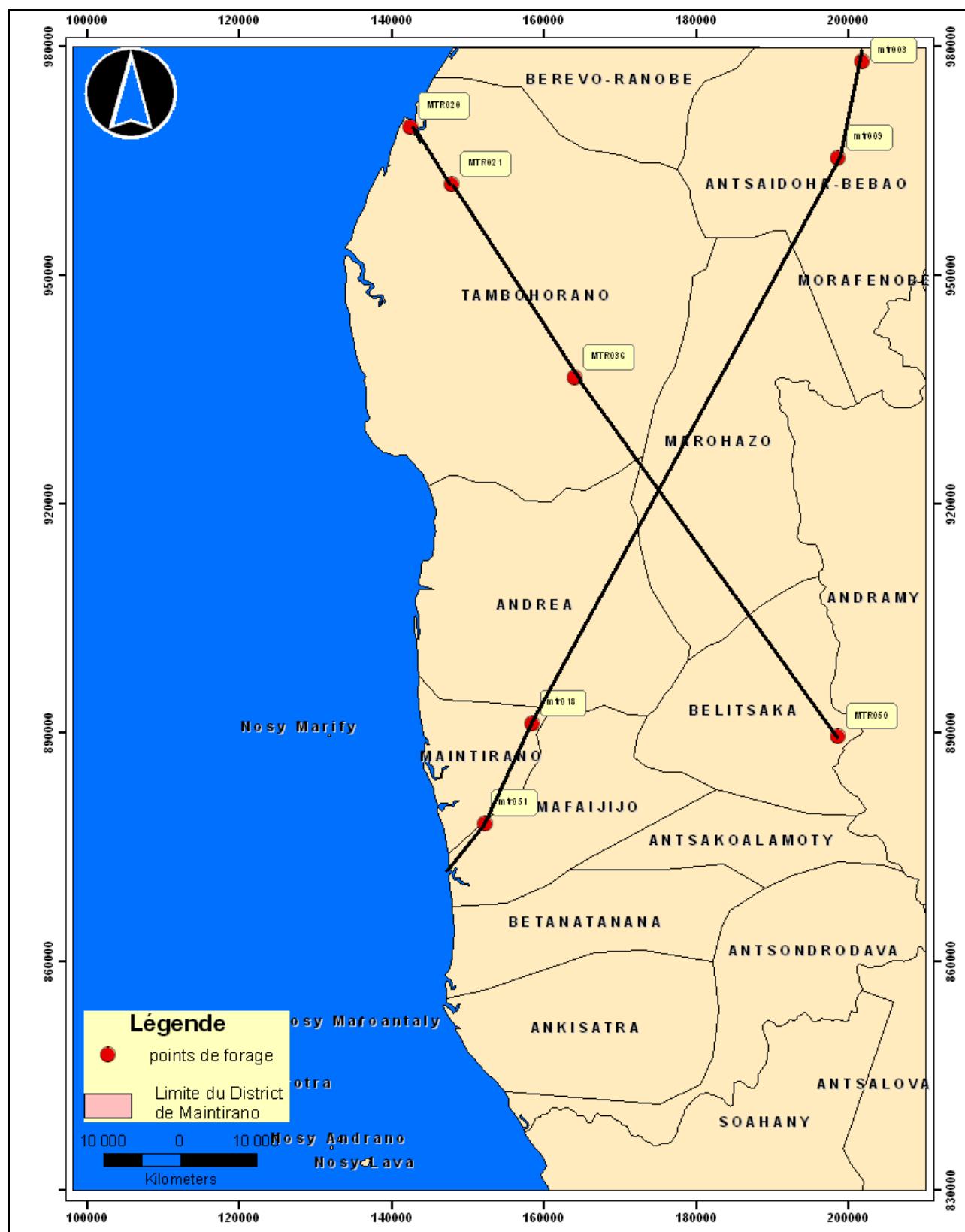


Figure 12 : Les forages représentatifs suivant le long des deux profils

III.1.1. Suivant le profil AB

Site MTR020

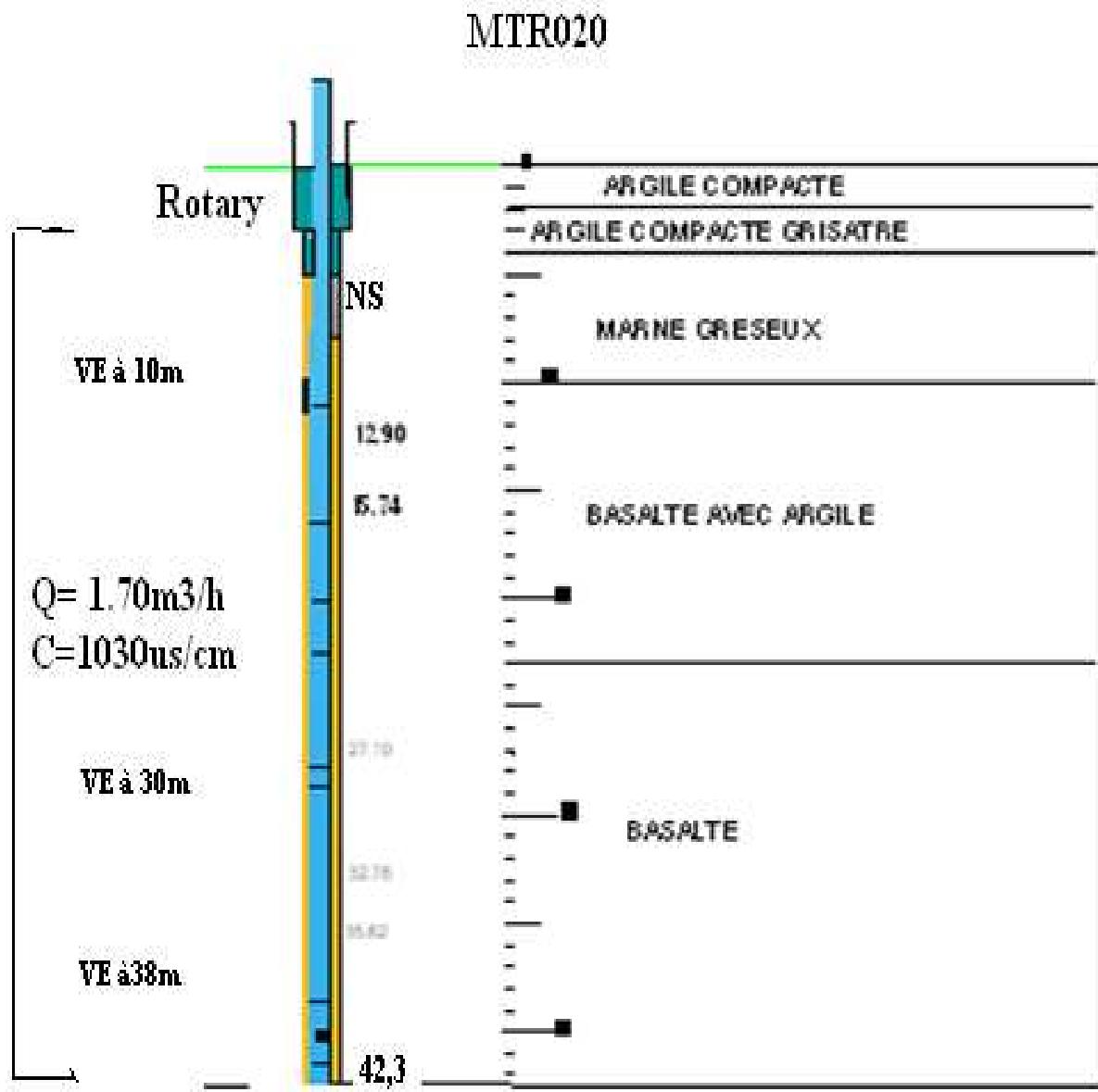


Figure 13 : Coupe de forage pour le site MTR020

Pour ce point de forage, la lithologie montre une succession de deux formations bien distinctes ; la formation sédimentaire a une épaisseur de 15m environ. et l'intrusion basaltique

Face aux caractéristiques des roches traversées, le forage rotary a été arrêté à 3m de profondeur, puis on passe au forage à marteau fond de trou jusqu'à l'arrêt de la perforation.

On note également trois venues d'eau : la première 13m de profondeur avec un débit de 0,3m³/h, la seconde à 27m pour un débit de 0,54 et la troisième à 36 m où le débit monte jusqu'à 1,7m³/h. On remarque aussi une augmentation de la valeur de la conductivité allant de la surface vers la profondeur (810 à 1030 µs/cm).

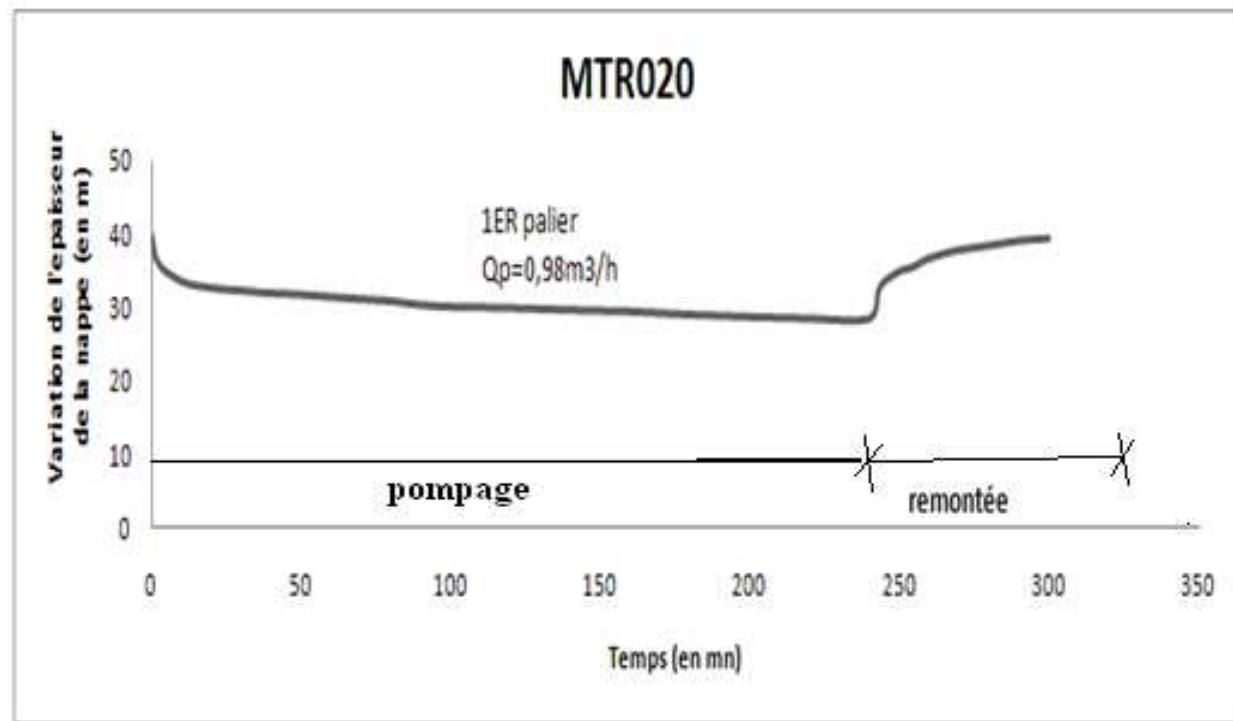


Figure 14 : Variation du niveau dynamique lors de l'essai par pompage pour le site MTR020

Le débit de l'ouvrage est fixé à $1,10\text{m}^3/\text{h}$ après soufflage, ce qui implique à l'unique palier avec une pression assez faible et le débit de la pompe doit être inférieure à celui de la nappe ($Q_p = 0,98 \text{ m}^3/\text{h}$).

Durant les 4h de temps de pompage, le niveau dynamique est presque constant après l'enlèvement de l'effet de puits, après 1h de l'arrêt de pompage appelé temps de remonté, l'eau reprend son niveau initial. Pour cette ouvrage le rabattement résiduel est égale à 0,22m (Niveau statique initial – niveau dynamique fin essai : 2,67- 2,89)

Site MTR021

MTR021

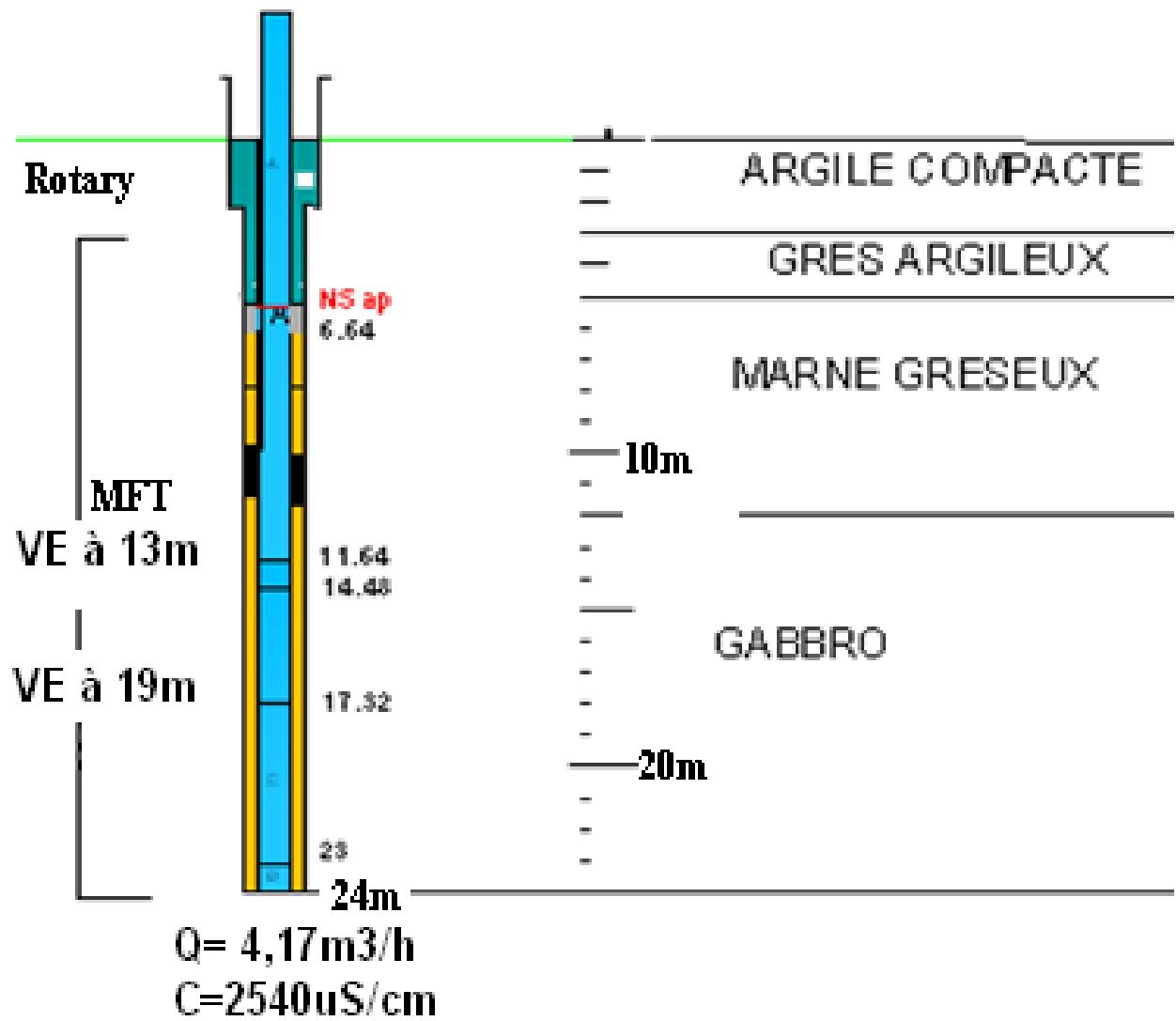


Figure 15 : Coupe de forage pour le site MTR021

En comparant ce site par rapport au précédent, il n'y a pas trop de différence, la formation sédimentaire couvre le socle (gabbro au lieu de basalte), et la couche superficielle est la même, (argile compacte). En traversant cette couche d'argile, on a utilisé le trilâme de 10" comme taillant, c'est donc du forage rotary. Après avoir traverser cette épaisseur, le sondeuse doit changer le taillant par du tricône, cette type de taillant est utilisé lorsque le terrain à perforez est dure.

La profondeur du trou de forage est de 24m mais suite à un éboulement de 1m, elle n'est qu'à 23 après équipement.

Cette coupe montre aussi trois venues d'eau : la première à la même profondeur que celle du site MTR020 (13m) mais avec un débit plus élevé de $2,35\text{m}^3/\text{h}$, la seconde à 19m pour m^3/h et la troisième à 23m de ce trou de forage avec un débit final de $7,7\text{m}^3/\text{h}$. Comme le site MTR020 on remarque l'accroissement de la valeur de la conductivité de la surface vers la profondeur (de 2250 à $2540\mu\text{s/cm}$).

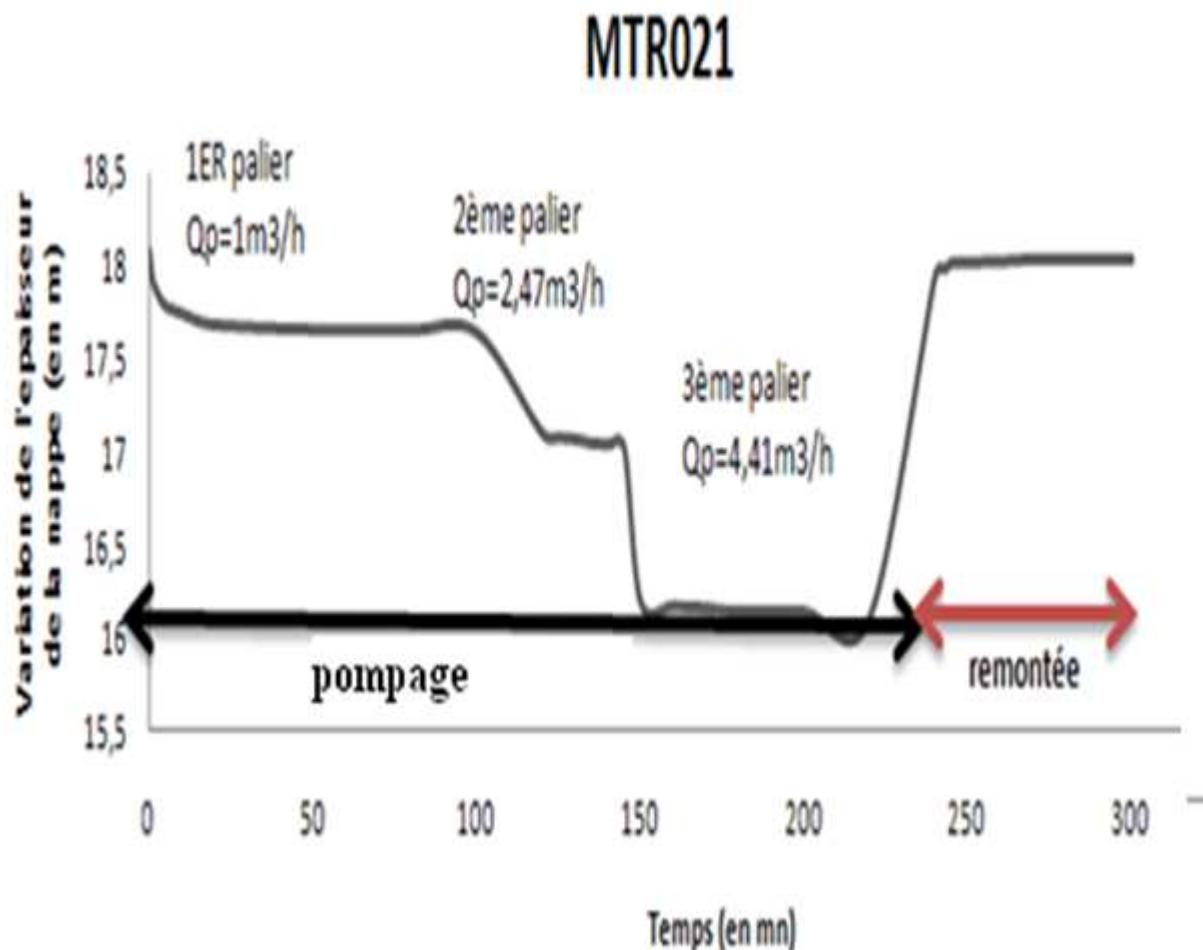


Figure 16 : Variation du niveau dynamique lors de l'essai par pompage site MTR021

Pour ce site, le débit est important ($4,17\text{m}^3/\text{h}$, après le développement de l'ouvrage), la courbe ci-dessous montre qu'on a été réalisé trois paliers successifs, le premier pour une durée de deux heures avec un débit de pompage égale $1\text{m}^3/\text{h}$, puis on l'augmente au deuxième palier ($Q_p=2,47\text{m}^3/\text{h}$) durant une heure, et au troisième palier, le débit de la pompe doit être maximal ($Q_p=4,41\text{m}^3/\text{h}$).

On remarque que le débit de la pompe dépasse celui de l'ouvrage juste avant l'arrêt de pompage, c'est qui provoque le trou sur la courbe correspondant au troisième palier. On peut dire alors que l'ouvrage est productif (moins profond mais avec un débit plus élevé).

Site MTR036

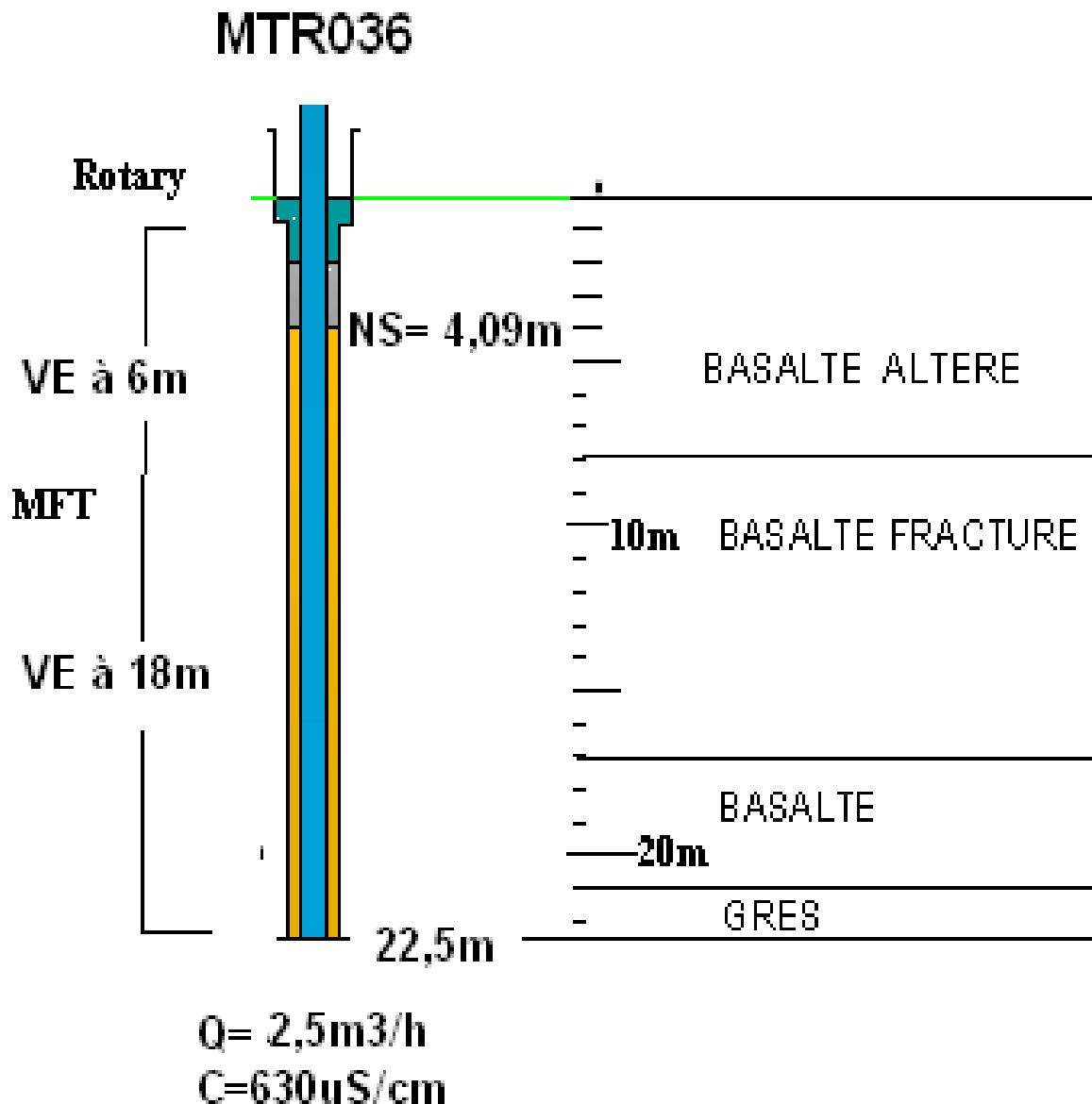


Figure 17 : Coupe de forage pour le site MTR036

Le trou de forage est allé jusqu'à 22,5m de profondeur et suivant cette dernière, on a une variation du débit de même pour celle de la conductivité électrique de l'eau pour chaque venue d'eau qui est au nombre de deux (02) ; pour la première venue d'eau situé à une profondeur de 6m, le débit est de $0,6 \text{m}^3/\text{h}$ et de conductivité de $620 \mu\text{S/cm}$. Pour la deuxième, à 18m, le débit de la nappe a une augmentation de $2,5 \text{m}^3/\text{h}$, c'est la fracturation du basalte qui favorise la recharge de la nappe, conditionnée par la densité et l'ouverture de la fracturation.

D'après cette coupe, le forage rotary a été arrêté juste quelque mètre de profondeur

(1m). Cela nous indique que le terrain est dure d'où changement de l'outil de perforation.

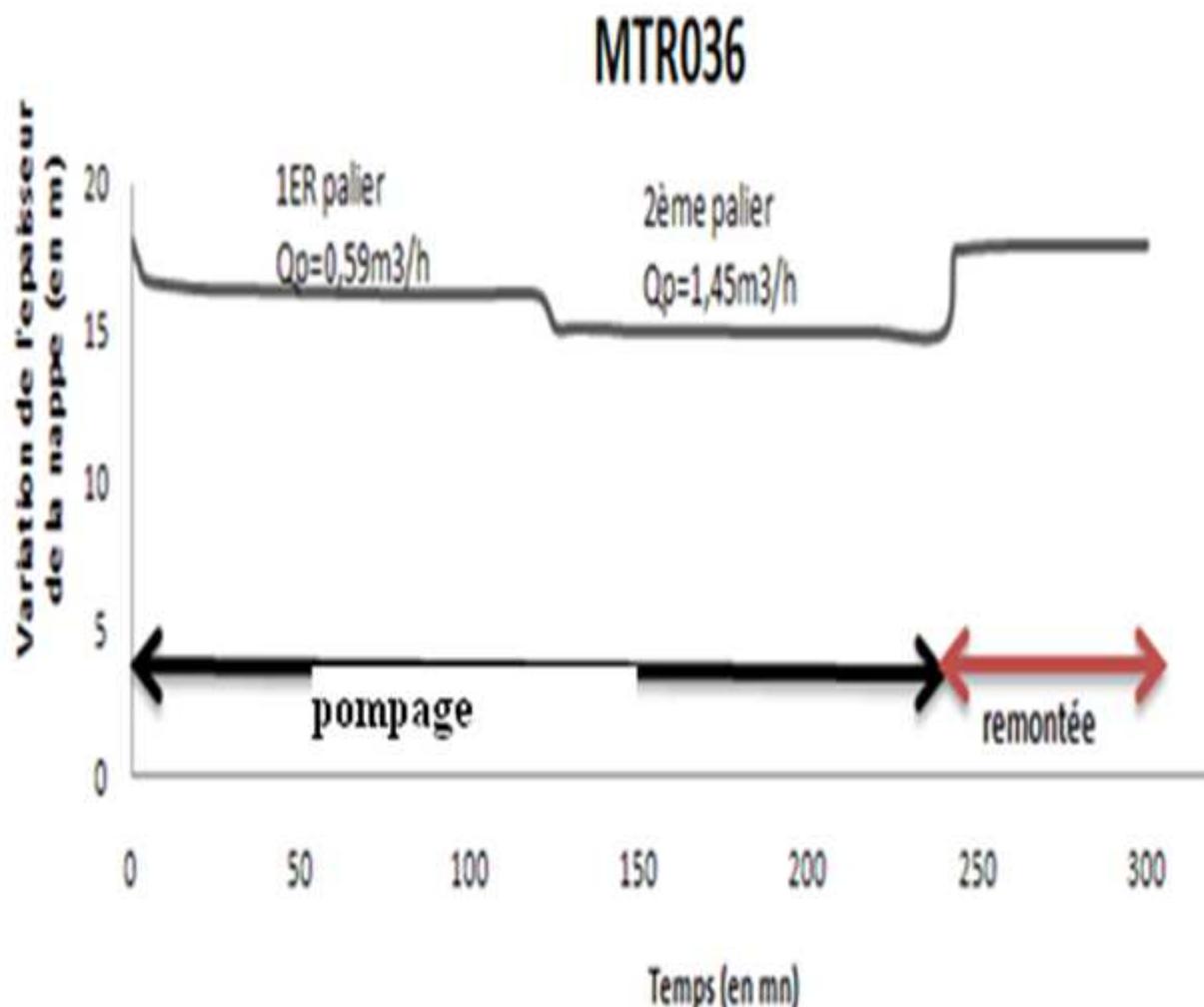


Figure 18 : Variation du niveau dynamique lors de l'essai par pompage site MTR036

Pour cet ouvrage portant le code MTR036 le débit est à $2,5\text{m}^3/\text{h}$ à la fin du soufflage, dont on a été réalisé deux palier successifs lors du pompage dont le premier palier a un débit de pompage égale à $0,59\text{m}^3/\text{h}$ pendant deux heures de temps, le second à $1,45\text{m}^3/\text{h}$ et dure deux heures. Après l'enlèvement de l'effet de la capacité de puits, le niveau de la nappe est à peu près de 5m, après le 2h de pompage, c'est-à-dire à la fin du premier palier, il est à 1,4m en dessous du précédent. A l'arrêt de pompage, l'eau est à 7,1m de profondeur.

On remarque que le niveau d'eau est linéaire durant la phase de pompage (pas de trou) ; après l'arrêt, le niveau revient celui du niveau statique initial.

Site MTR050

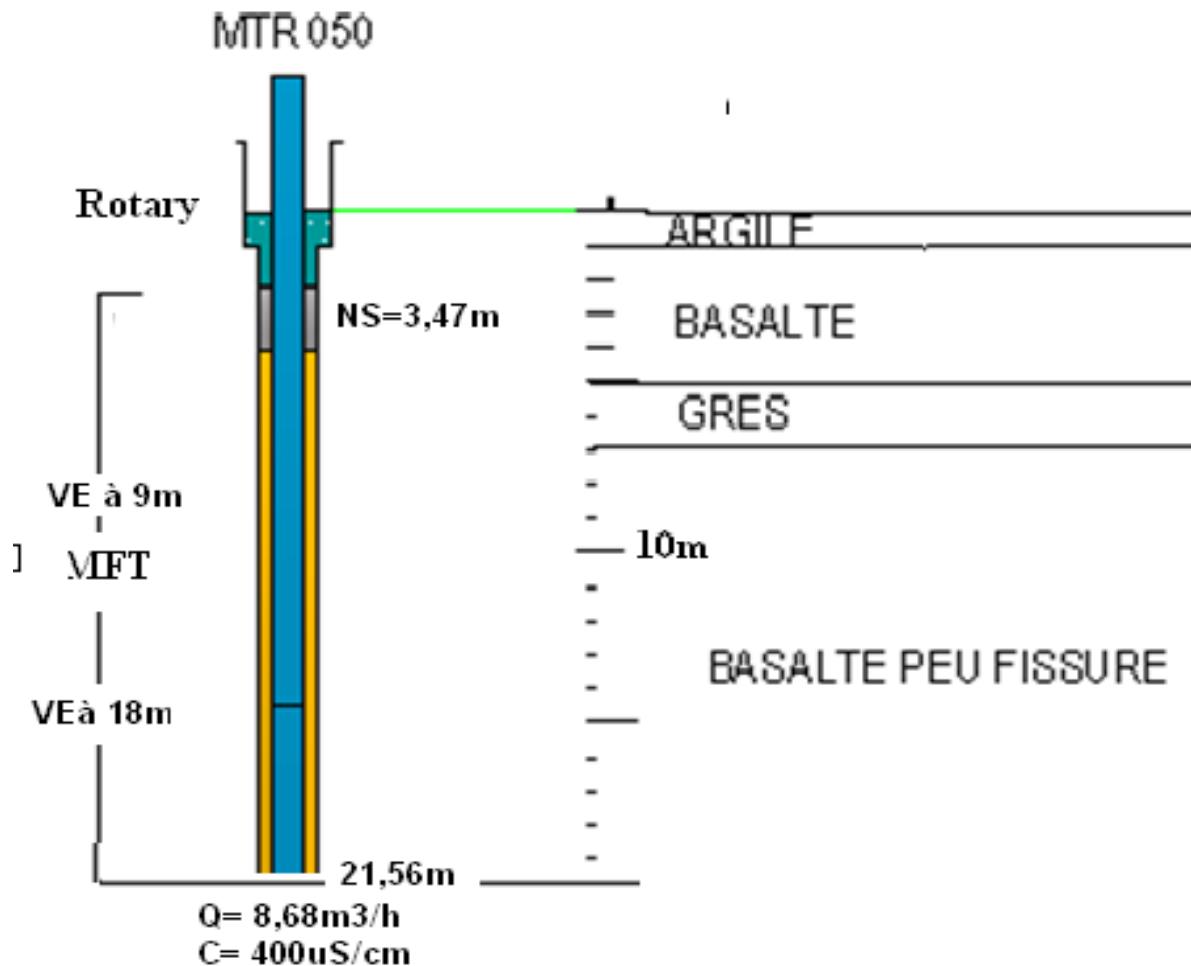


Figure 19 : Coupe de forage pour le site MTR050

Sur cette coupe, l'argile est la couche superficielle avec une épaisseur égale 1m perforé par du trilâme, puis l'intrusion basaltique environ 4m d'épaisseur, ensuite une couche de grès de 2m, et enfin le basalte qui est ici le substratum de la nappe. Après avoir traversé la couche d'argile le taillant doit être changé par du tricône.

Deux venues d'eaux ont été rencontrées, la première à 9m de profondeur et la deuxième à 13m mais les deux sont

D'après cette lithologie, on a une nappe captive. Le pH pour ce site est basique (pH=7,81), dont on peut considérer le basalte comme aquifère.

La profondeur du forage est allé jusqu'à 21,56m, à cette profondeur le débit est égale à 8,68m³/h après soufflage, la conductivité est égale à 400µS/cm.

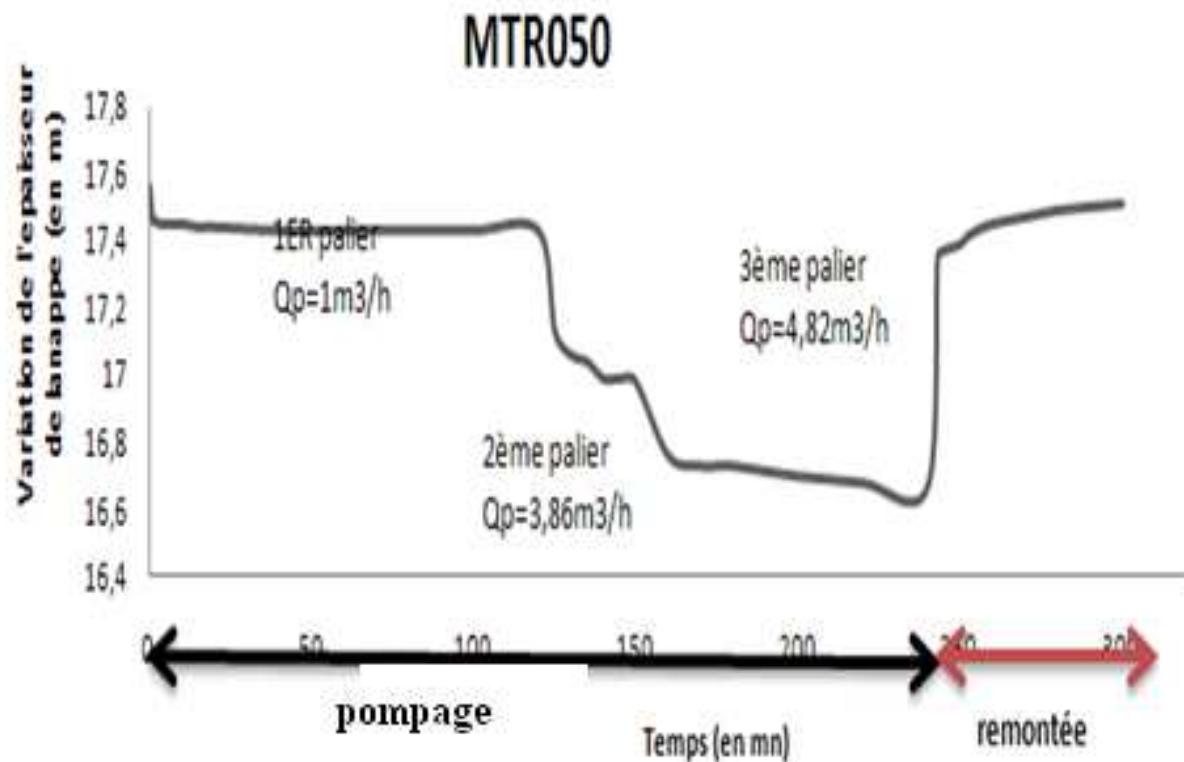


Figure 20: Variation du niveau dynamique lors de l'essai par pompage site MTR050

L'importance du débit pour cet ouvrage ($8,68\text{m}^3/\text{h}$) permet à la réalisation des trois paliers durant l'essai de pompage qui dure 4h au total.

Après l'enlèvement de l'effet de la capacité de puits, le niveau de l'eau est environ 4,2m. A la fin du premier palier, elle se trouve à 0,70cm au dessous du niveau initial correspond au débit de pompage égale à $1\text{m}^3/\text{h}$. Puis on passe tout de suite au deuxième palier qui dure 1h, avec un débit de $3,86\text{m}^3/\text{h}$, durant le troisième palier le débit est fixé à $4,82\text{m}^3/\text{h}$ à la fin de cet essaie, le niveau d'eau remonte à 5,98m de la surface.

Tableau 3 : Récapitulatif et comparatif des caractéristiques des forages suivant le profil AB

CODE POINT DE FORAGE	MTR020	MTR021	MTR036	MTR050
Profondeur (en m)	42,30	24	22,50	21,55
Débit (m ³ /h)	1,70	4,17	2,50	8,68
Nombre palier	1	3	2	3
Roche d'aquifère	Basalte	Gabbro	Basalte	Basalte
Nappe	CAPTIVE	CAPTIVE	CAPTIVE	CAPTIVE
Niveau statique (m)	6,8	6,64	4,09	3,47
Rabattement résiduel à la fin de l'essai (m)	0,22	0,04	0,11	0,05
Conductivité (µS/cm)	1030	2530	630	400

En général, les profondeurs de forages sont en moyenne de l'ordre de 22m sauf pour le point MTR020 (42,30m).

L'aquifère est généralement constitué par du basalte, avec un toit plus ou moins imperméable, d'où la nature de nappe est captive suivant ce profil AB.

A la fin du développement ou soufflage de ces ouvrages, les niveaux d'eau se trouvent entre 3,47 et 6,8m) et le débit varie entre 0,7(MTR020) et 8,68m³/h (MTR050).

En termes de minéralisation de l'eau, on constate que plus on s'éloigne de la côte plus la valeur de la conductivité diminue.

Quand on effectue le pompage, le débit de l'ouvrage détermine le nombre de paliers effectués, le tableau montre que, pour un débit inférieur à 1,10m³/h en général, on n'effectue qu'un seul palier de 4h, entre 1,10 et 2,50m³/h, il est au nombre de deux, et en dehors de cette intervalle, on peut faire trois paliers. Le rabattement résiduel à la fin de l'essai est inférieur à 0,3 le long du profil AB.

III.1.2. Suivant le profil CD

Site MTR051

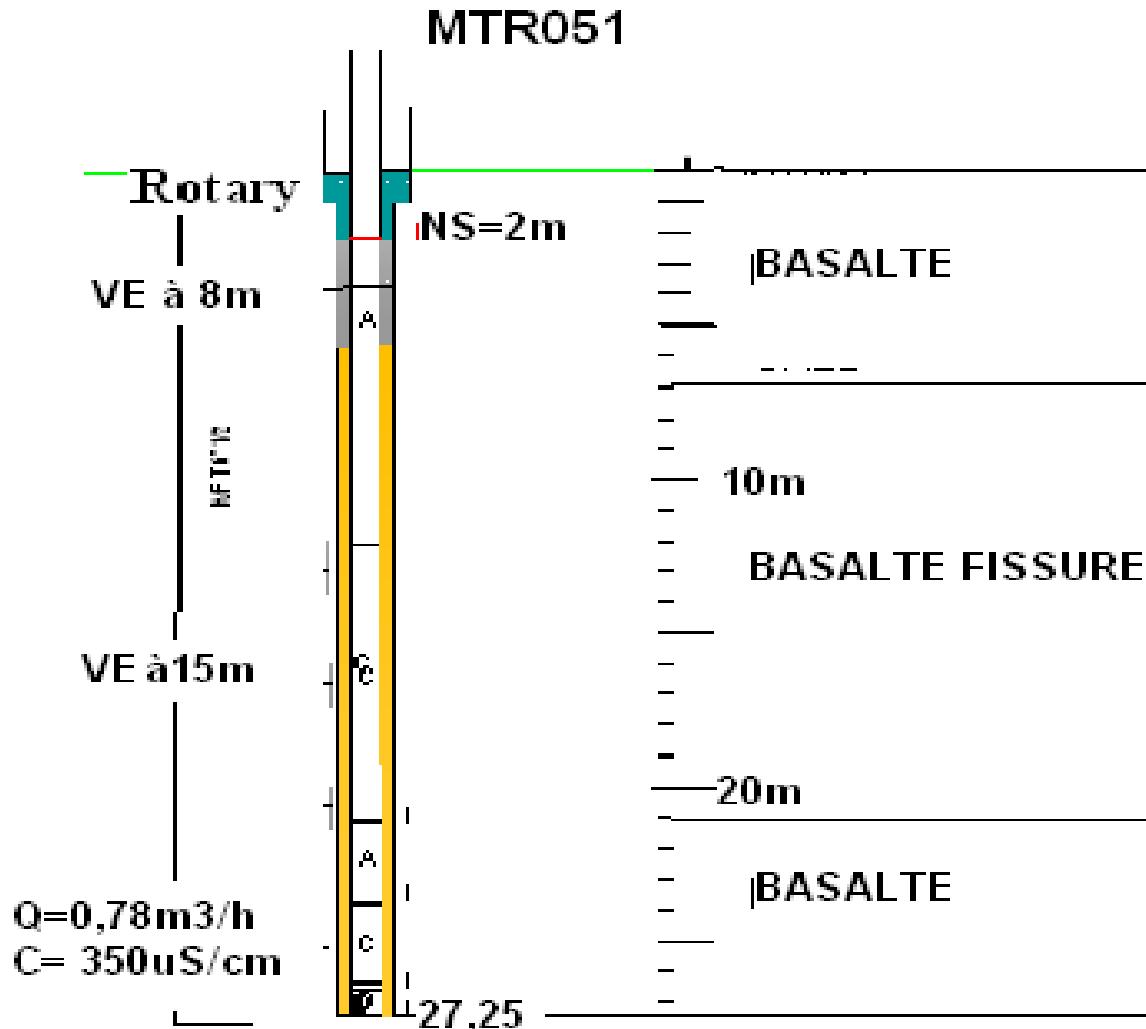


Figure 21 : Coupe de forage pour le site MTR051

Pour ce site, l'intrusion basaltique affleure en surface et constitue l'aquifère de la nappe. Avec ce type de roche, le forage à rotary n'est pas permis. Le mieux c'est d'utiliser le marteau fond du trou ou MFT dès le début de perforation.

La recharge de la nappe est donc assurée par l'infiltration des eaux de pluie, c'est la densité de fissuration du basalte qui détermine le volume d'eau souterraine.

A 7m de profondeur, on rencontre la première venue d'eau par la roche (le premier se trouve à 15m et le second à 18m).

Quelques mètres avant l'arrêt des travaux (à 22m), le débit est à 0,78m³/h et la conductivité de 350 μ S/cm) et le niveau d'eau se trouve à 2m de profondeur.

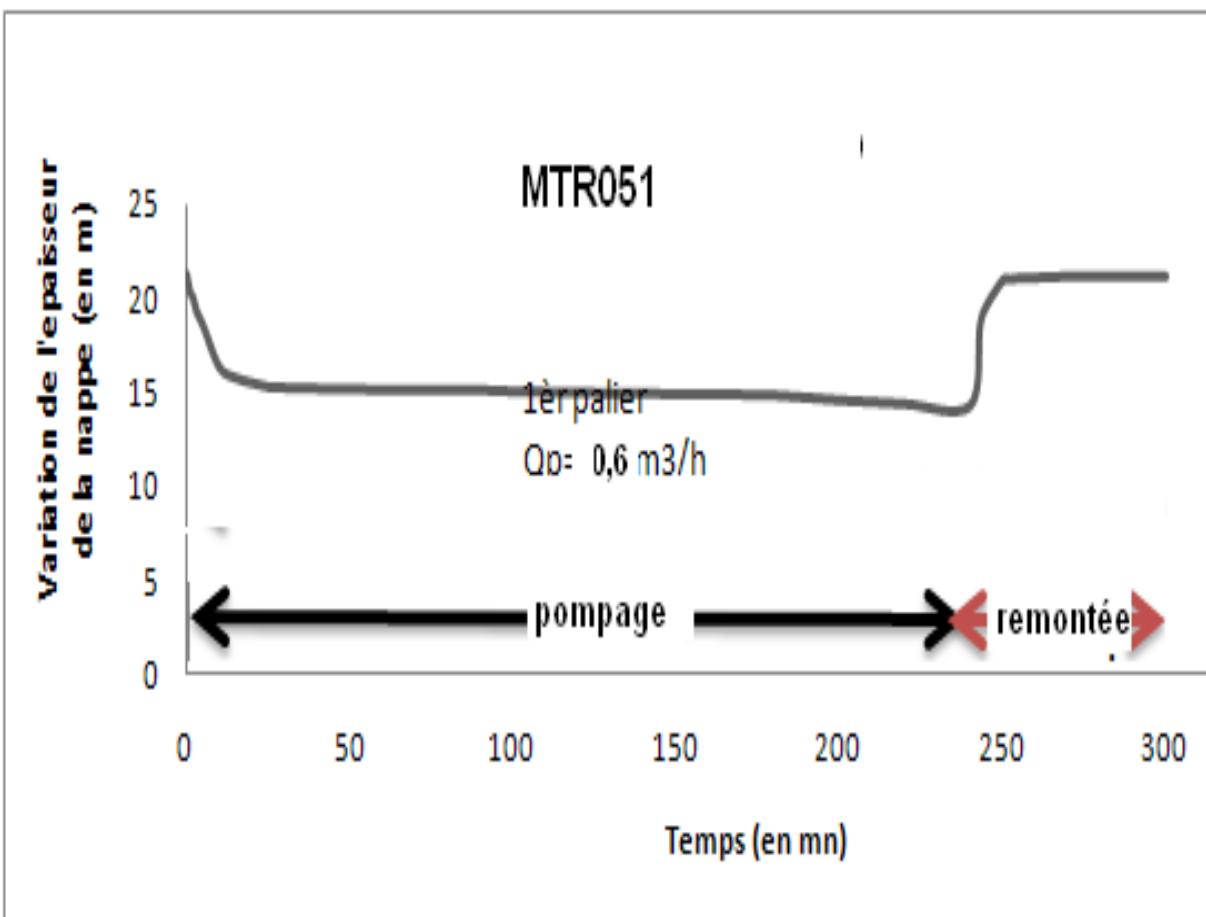


Figure 22 : Variation du niveau dynamique lors de l'essai par pompage site MTR051

Pour ce point d'eau, le débit est suffisamment faible ($Q=0,70\text{m}^3/\text{h}$), ainsi, on ne peut réaliser qu'un seul palier lors de l'essai par pompage. Le débit de pompage est fixé à $0,6\text{m}^3/\text{h}$ durant les quatre heures de pompage. Avant l'essai, l'épaisseur de la nappe est de 22m, puis elle s'est diminué jusqu'à 15m à la fin de pompage de 4h.

Après une heure de repos, le niveau d'eau est presque atteint son niveau statique initial, le rabattement résiduel est égale à 0,11m.

MTR018

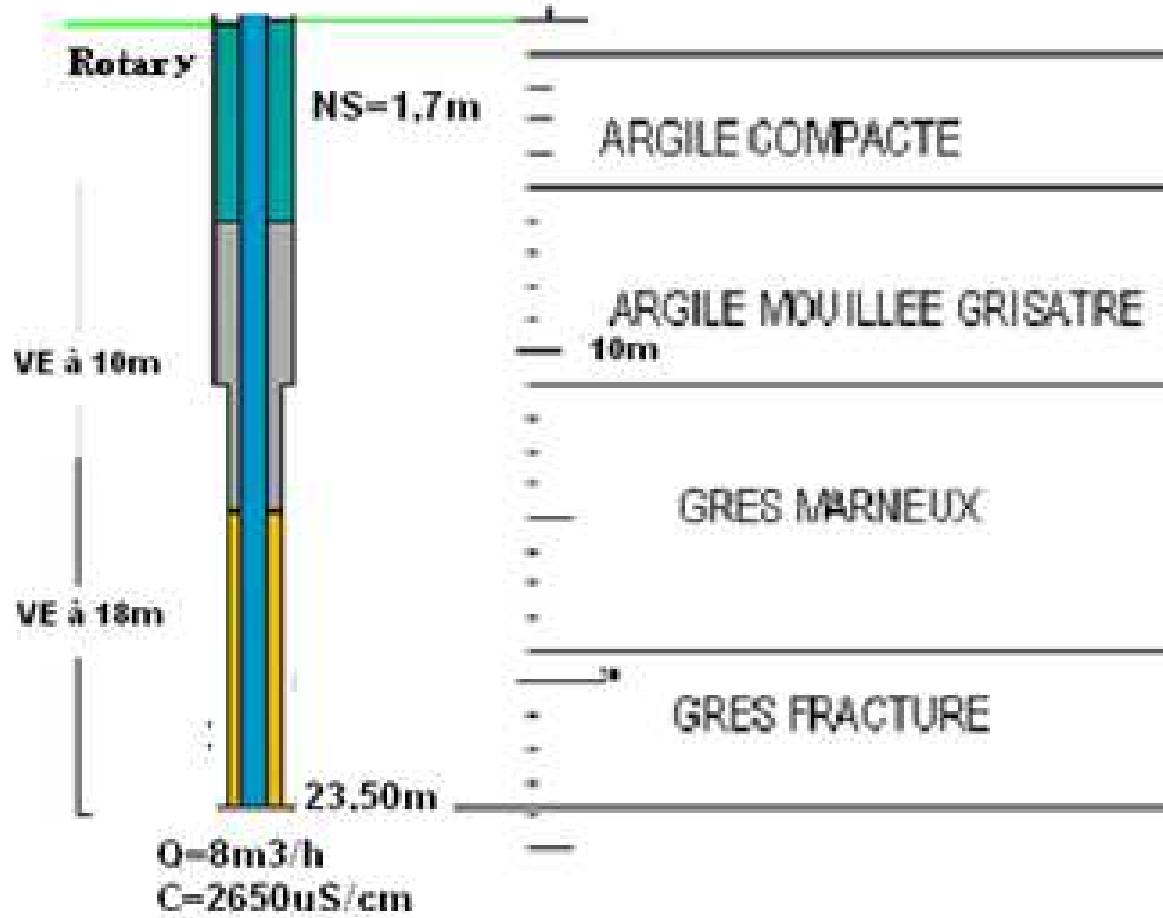


Figure 23 : Coupe de forage pour le site MTR018

Sur cette coupe, il n'y a que de la formation sédimentaire allant du surface jusqu'au fond du trou de forage (23,50m). la nappe est encaissée dans le grès surmonté par de l'argile. Le débit est plus intéressant ($Q=8m^3/h$), la conductivité est de $2560\mu S/cm$. Après le développement de cet ouvrage, le niveau de l'eau est à 1,7m de profondeur.

Par rapport aux autres sites de forage (forages représentatifs), ce point a une particularité au niveau de la lithologie, la nature de la roche aquifère. L'épaisseur de la couche d'argile est suffisamment importante (11m). on a utilisé de trilâme pour perforez cette épaisseur, par la suite on va passer au forage MFT. Ceci nous dit indirectement que la couche marneuse est dure.

MTR018

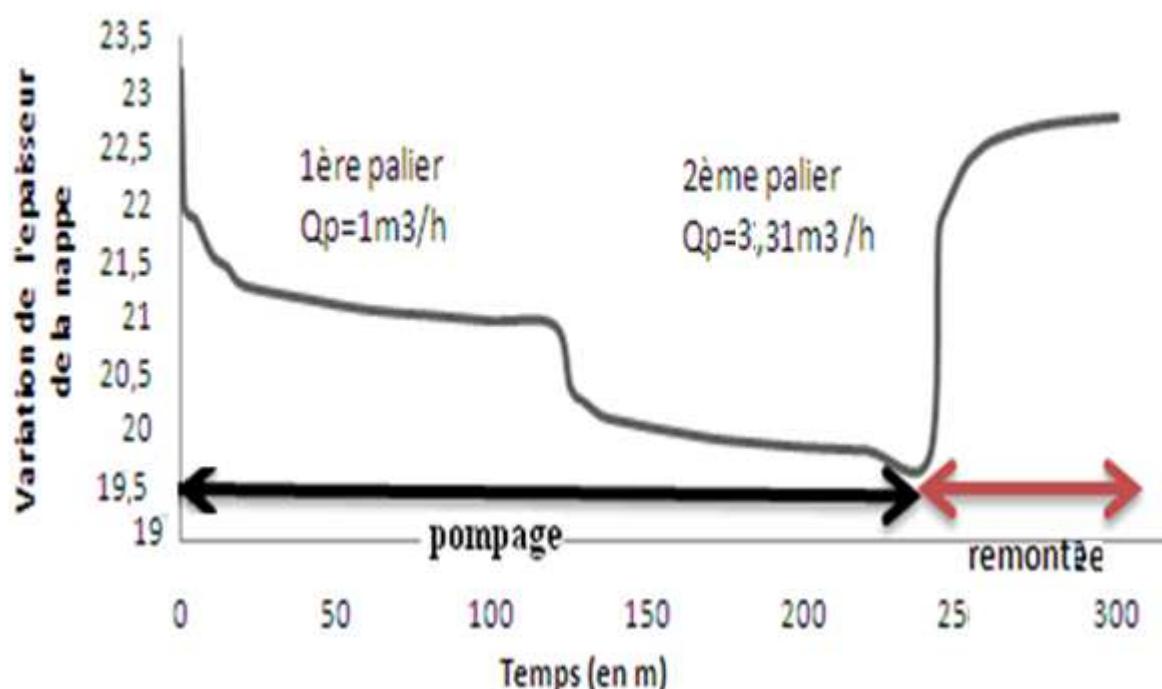


Figure 24 : Variation du niveau dynamique lors de l'essai par pompage site MTR018

Sur l'axe des ordonnées, après l'enlèvement de l'effet de capacité de puits, on voit que l'épaisseur de la nappe est environ à 22m. avec le débit produis par cet ouvrage ($8m^3/h$), on a réalisé 2 paliers de 2h chacun. Le premier est pompé à avec un débit de $1m^3/h$ qui correspond à un rabattement de 0,7m, et le second pour un débit de pompage a été fixé à $3,31m^3/h$. juste à l'arrêt de pompage, le niveau dynamique de la nappe est à 3m.

Après 1h de pose après le 4h de pompage, le niveau d'eau remonte, le rabattement résiduel est égale à 0,42m.

Site MTR009

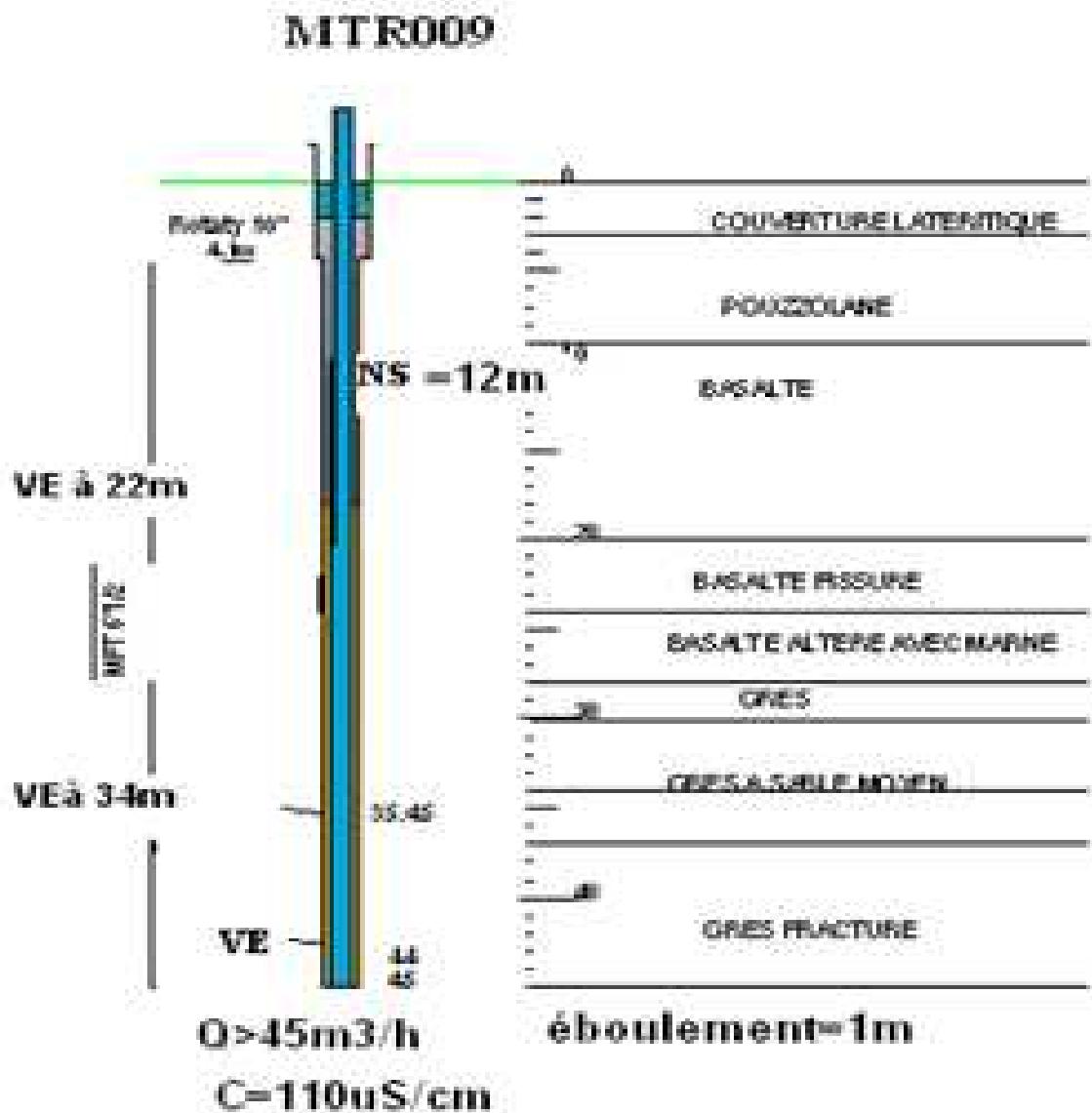


Figure 25 : Coupe de forage pour le site MTR018

La coupe nous indique différentes couches traversées le long du trou de forage, la succession est comme suit : en surface, la couverture latéritique avec une épaisseur de 3m, puis en dessous, la pouzzolane avec une épaisseur de 7m, ensuite du basalte, et en profondeur du grès.

A 22m de profondeur, une venue d'eau a été rencontrée c'est-à-dire dans la couche basaltique et une deuxième dans la couche du grès à 34m.

Après l'équipement de ce forage, la profondeur équipée est moins 1m à celle forée cause d'un éboulement.

Le niveau de l'eau est à 12m, le débit est supérieur à 45m³/h avec une valeur de

conductivité suffisamment faible ($110\mu\text{S}/\text{cm}$).

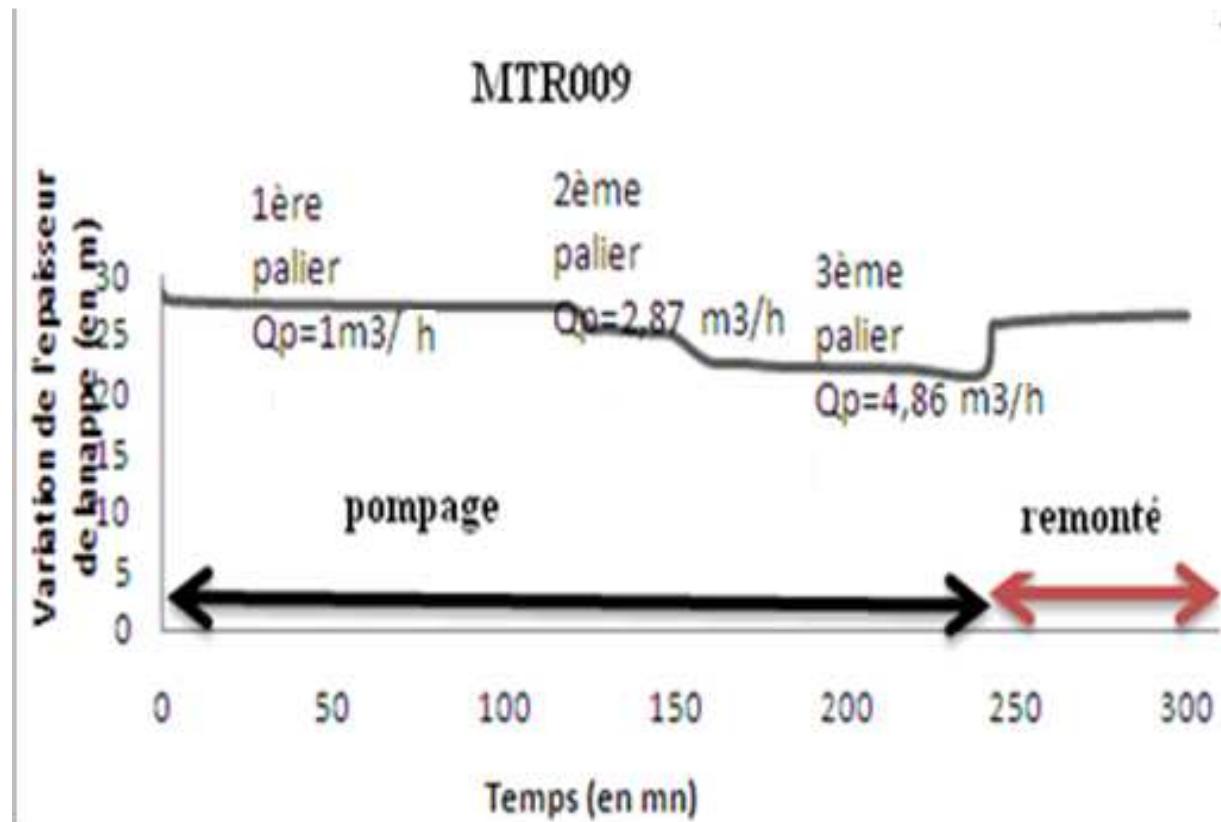


Figure 26 : Variation du niveau dynamique lors de l'essai par pompage site MTR018

L'importance du débit pour cet ouvrage (supérieur à $45\text{m}^3/\text{h}$) permet à la réalisation des trois paliers lors de l'essai par pompage qui dure 5h au total (4h de pompage et 1h de remontée).

Avant la réalisation de l'essai, le niveau d'eau est à 12m, à la fin du premier palier c'est-à-dire après 2h de pompage, elle se trouve à 0,15cm au dessous du niveau initial correspondant au débit de pompage égal à $1 \text{ m}^3/\text{h}$. Puis on passe tout de suite au deuxième palier qui dure 1h, avec un débit de $2.87\text{m}^3/\text{h}$, durant le troisième palier le débit est fixé à $4.86\text{m}^3/\text{h}$. à la fin de cet essai, le rabattement résiduel est égal à 0,07m du surface

Site MTR003

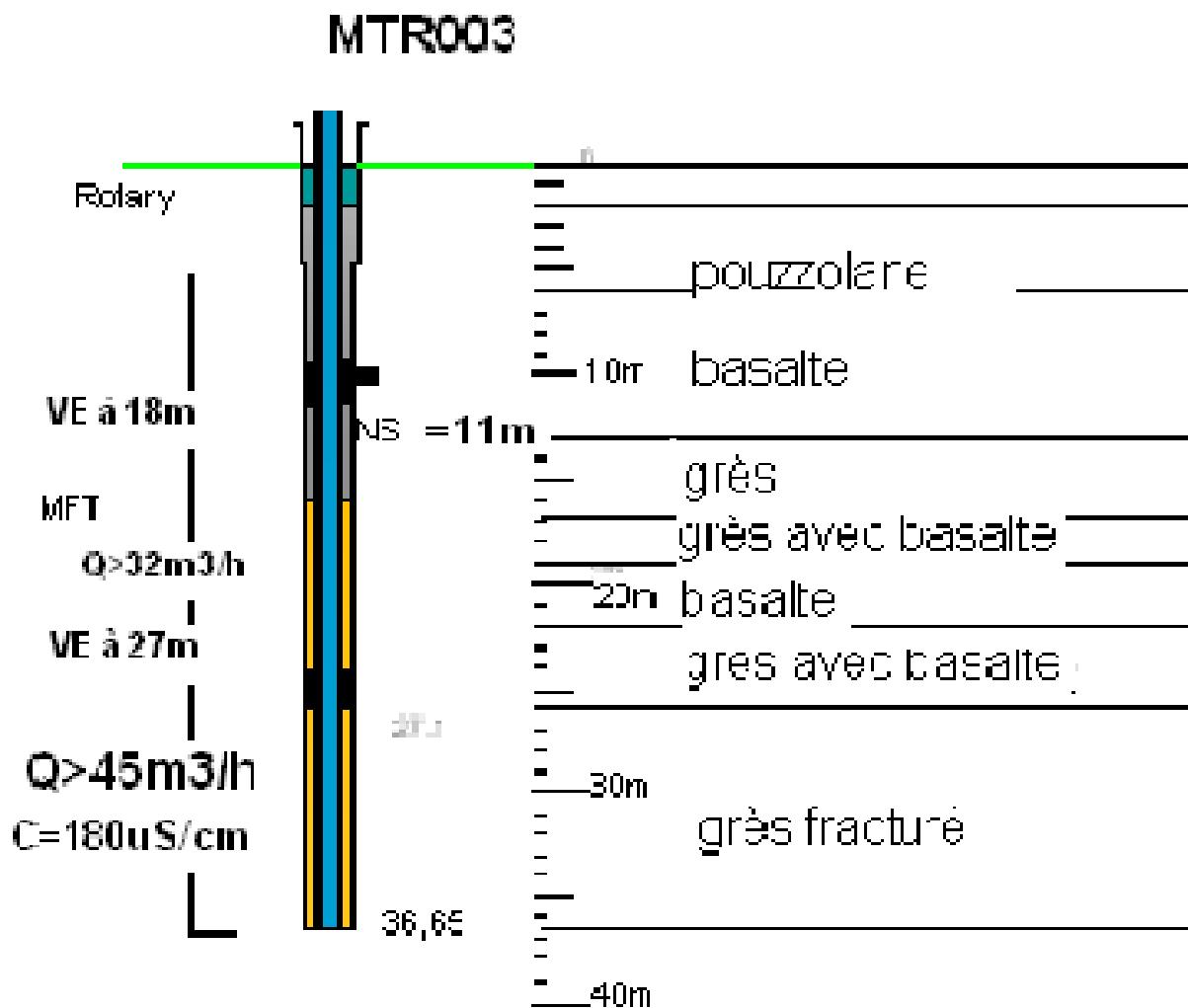


Figure 27 : Coupe de forage pour le site MTR003

Pour MTR003, la coupe a une ressemblance avec celle du 009 au point de vue lithologie. La coupe nous indique différente couche traversée le long du trou de forage, la succession est comme suit : en surface, la couverture latéritique avec une épaisseur de 3m,

puis en dessous, la pouzzolane avec une épaisseur de 7m, ensuite du basalte, et en profondeur du grès.

Face à la caractéristique des couches surtout la dureté et la compaction, le forage rotary est limité à 5m de profondeur c'est-à-dire pour la perforation de la couche de pouzzolane, le reste se fait par le forage à marteau fond de trou.

A 22m de profondeur, on rencontre la première venue d'eau, c'est-à-dire dans la couche basaltique et une deuxième dans la couche du grès à 34m. Après l'équipement de ce forage, la profondeur équipée est moins de 1m à celle forée cause d'un éboulement.

Le niveau de l'eau est à 12m, le débit est supérieur à $45 \text{m}^3/\text{h}$ avec une valeur de conductivité suffisamment faible ($110 \mu\text{S}/\text{cm}$).

MTR003

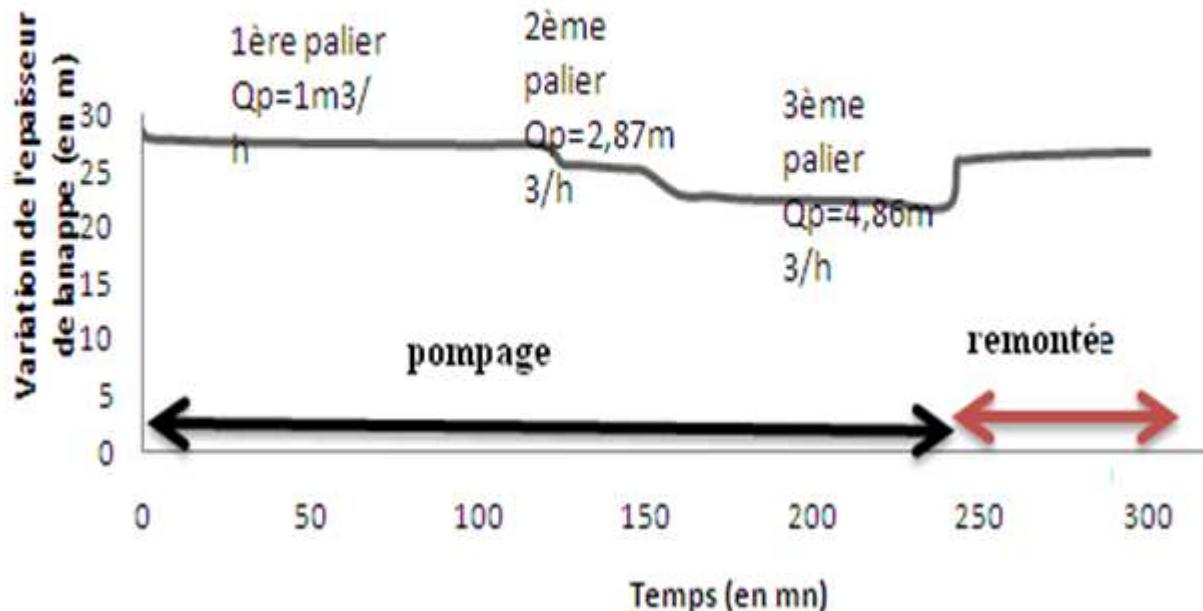


Figure 28 : Variation du niveau dynamique lors de l'essai par pompage site MTR018

Comme le précédent site (MTR009) le débit pour cet ouvrage supérieur à $45\text{m}^3/\text{h}$. ceci nous permet de réalisation trois paliers lors de l'essai par pompage qui dure 5h au total (4h de pompage et 1h de remontée).

Avant la réalisation de l'essai, le niveau d'eau est à 12m, à la fin du premier palier c'est-à-dire après 2h de pompage, elle se trouve à 0,15cm au dessous du niveau initial correspondant au débit de pompage égal à $1\text{ m}^3/\text{h}$. Puis on passe tout de suite au deuxième palier qui dure 1h, avec un débit de $2,87\text{m}^3/\text{h}$, durant le troisième palier le débit est fixé à $4,86\text{m}^3/\text{h}$. à la fin de cet essai, le rabattement résiduel est égal à 0,07m du surface

Pendant quatre heures (4h) de temps de pompage, le rabattement (S) enregistré à la fin du pompage est de 1.89m.

La remontée du niveau de l'eau dans l'ouvrage toutes les 20 minutes :

- De 0 à 20 mn : la remontée est un peu rapide.
- de 20 à 40 mn : la remontée est trop lente.
- de 40 à 60 mn, la remontée est stagnante

Donc, Avec un débit de $45\text{ m}^3/\text{h}$ et un rabattement de $0,49\text{ m}$, cela indique que la nappe répond bien au pompage. L'alimentation de l'ouvrage est assez régulière et potentielle. Il s'agit d'un bon aquifère.

Tableau 4 : Récapitulatif et comparatif des caractéristiques des forages suivant le profil CD

CODE POINT DE FORAGE	MTR051	MTR018	MTR009	MTR003
Profondeur (en m)	27,25	23,5	45	36,65
Débit (m ³ /h)	0,75	8	>45	>45
Roche aquifère	Basalte	Grès	Grès	Grès
Nappe	CAPTIVE	Semi-captive	Semi-captive	Semi-captive
Niveau statique	2	1,7	12	4,09
Nombre de palier	1	2	3	3
Rabattement résiduel à la fin de l'essai	0,11	0,42	0,07	0,49
Conductivité	350	2650	110	180

On peut dire après les différentes coupes (concernant les 8 forages représentatifs) que la nature du système aquifère est à peu près la même dans cette zone. Comme roche aquifère on pourrait rencontrer, soit du grès, soit du basalte. La profondeur est de la nappe ne dépasse pas 50m. Pour la partie sud de Maintirano, elle est environ de 25m, tandis que pour la partie Nord, la nappe est plus profonde (plus de 30m).

D'après les valeurs du débit représentées dans le tableau3 et tableau4, on constate qu'en s'éloignant de la côte, le débit est devient plus intéressant (supérieur à 45m³/h pour les sites MTR009 et MTR003), avec des valeurs de conductivité faible. Sur ces même tableaux, nous avons vu que l'aquifère est constitué par du basalte ou de grès, surmonté par des couches moins perméables et parfois imperméables, d'où le type de nappe est donc semi-captive ou captive.

Dans l'ensemble sur les courbes de pompage, la première chute correspond à l'élimination de l'effet de puits, puis l'ouvrage se rétablit.

Pour le traitement, on utilise diverses outils permettant d'avoir les cartes de régionalisation l'objectif finale de cette étude.

La détermination du faciès, de l'origine, l'évolution de l'eau soit faite par l'utilisation d'un logiciel appelé : « AquaChem ». Ce logiciel nous permet de traiter les paramètres physico-chimiques de l'eau, avec les diagrammes (diagramme de Piper et celui de Schoëller) données après le traitement. On peut lire directement sur le graphe le nombre de faciès caractérisé une zone ainsi de faire la comparaison entre les eaux de composition physico-chimique voisines.

III.2. RESULTATS DE L'ANALYSE PHYSICO-CHIMIQUE FAITE PAR LE JIRAMA

Le traitement sous AquaChem soit fait en utilisant les données physiques et chimiques des échantillons d'eau de forage du District de Maintirano (à partir des (par les) résultats d'analyse des échantillons d'eau effectués par la JIRAMA. II.21 Les données physiques.

Les paramètres physiques nécessaires sont les Matières organiques (MO [mg/L]), Turbidité (Turb [NTU]), Température :T [$^{\circ}$ C], pH, Minéralisation totale ou TDS (Total Dissolved Salts [mg/L]), Conductivité électrique : CE [μ S/cm]. Ces paramètres physiques définissent aussi les caractéristiques des eaux et en relation avec la minéralisation des eaux.

III.2.1. Les paramètres physiques

III.2.1.1. Matières organiques (MO [mg/L])

Les produits en décomposition d'origine animale ou végétale élaborées sous l'influence des microorganismes donnent naissance les matières organiques dans les eaux naturelles. L'importance de la teneur en matière organique indique la contamination microbienne de l'eau.

Tableau 5 : Classification des eaux

Eaux très pures	MO < 1 mg
Eaux potables	MO de 1 à 2 mg
Eaux suspectes	MO de 2 à 4 mg
Eaux mauvaises	MO > 4 mg

III.2.1.2. Turbidité (Turb [NTU])

La turbidité donne une idée sur la teneur en matière en suspension (MES Matière en Suspension) dans l'eau analysée. La présence des particules non dissoutes confère à l'eau une certaine turbidité.

Elle donne un aspect désagréable à l'eau et constitue un écran au passage des rayons lumineux nécessaire aux activités biologiques. Mais une eau à faible turbidité n'est pas toujours potable. La valeur maximale admissible pour une eau potable est de 5 NTU.

III.2.1.3. Température (T [$^{\circ}$ C])

En général, la température de l'eau varie en fonction de la saison, plus faible après une saison fraîche et une légère augmentation en fin d'étiage.

Pour les eaux souterraines, la température dépend de la profondeur. La valeur maximale

admissible pour une eau potable est de 25 °C.

III.2.1.4. Potentiel hydrogène (pH)

Il caractérise l'acidité ou la basicité du milieu. La valeur de pH n'est pas très significative sur les fonctionnements des nappes et aquifères, il traduit l'homogénéité du faciès pétrographique de la région. Mais il représente une notion très importante pour la détermination de l'agressivité de l'eau. Sa valeur varie avec la nature des terrains traversés. Les normes de potabilité en pH : 6,5 à 9,5. Le pH influe sur la forme ainsi que sur la toxicité des produits chimiques.

III.2.1.5. Minéralisation totale : (TDS : Total Dissolved Salts [mg/L])

C'est un paramètre qui détermine la totalité des matières minérales dissoutes dans l'eau. La valeur maximale admissible pour une eau potable est de 2000 mg/L (OMS). Le tableau suivant montre le rapport entre les résidus secs qu'une eau souterraine contient.

Tableau 6 : Classification des eaux souterraines par rapport aux résidus sec

Qualité des eaux souterraines	Résidus secs [g/L de sels]
Douce	1
Faiblement salée	1 à 5
Saumâtre	5 à 10
Salée	10 à 50
Saumure	à partir de 50

III.2.1.6. Conductivité de l'eau (CE [μ S/cm])

C'est la capacité de l'eau à conduire plus ou moins bien un courant électrique. Elle est proportionnelle à la concentration d'ions présents dans la solution. Ainsi plus une eau est chargée en substances dissoutes, plus sa résistance électrique est faible.

La valeur de la conductivité électrique de l'eau peut avoir une influence avec la température. L'accroissement de la température fait augmenter la conductivité électrique. Ce phénomène s'explique par le fait que la mobilité des ions augmente. Une augmentation excessive de la conductivité entraîne à la fois une perturbation du milieu et une limite à l'utilisation comme source d'eau potable suite à des saveurs désagréables et désordres digestifs. La valeur maximale admissible pour une eau potable est de 2000 μ S/cm. Le tableau suivant montre la relation entre la conductivité et la minéralisation :

Tableau 7 : Rapport entre la conductivité et la minéralisation

C > 100 $\mu\text{S}/\text{cm}$	Minéralisation faible
100 $\mu\text{S}/\text{cm} < C < 333 \mu\text{S}/\text{cm}$	Minéralisation moyenne
333 $\mu\text{S}/\text{cm} < C < 666 \mu\text{S}/\text{cm}$	Minéralisation moyenne accentuée
666 $\mu\text{S}/\text{cm} < C < 1\,000 \mu\text{S}/\text{cm}$	Minéralisation importante
C > 1 000 $\mu\text{S}/\text{cm}$	Minéralisation élevée

Conductivité	Minéralisation
< à 50 $\mu\text{s}/\text{cm}$	1,365
50 à 166 $\mu\text{s}/\text{cm}$	0,547658
166 à 333 $\mu\text{s}/\text{cm}$	0,769574
333 à 833 $\mu\text{s}/\text{cm}$	0,715920
833 et 10.000 $\mu\text{s}/\text{cm}$	0,758544
> à 10.000 $\mu\text{s}/\text{cm}$	0,850432

(Source : mémento technique de l'eau, 1963).

III.2.2. Les données chimiques

D'après les résultats de l'analyse physico-chimique fait par le JIRAMA, plusieurs éléments chimiques sont disponibles et vraiment nécessaires pour effectuer cette étude, tels que :

- les cations : calcium (Ca^{++}), magnésium (Mg^{++}), sodium (Na^+), potassium (K^+), ammonium (NH_4^+), fer (Fe^{2+}), manganèse (Mn), aluminium (Al) ;
- les anions : carbonate (CO_3^{2-}), bicarbonate (HCO_3^-), chlorure (Cl^-), sulfate (SO_4^{2-}), nitrate (NO_3^-), nitrite (NO_2^-), phosphate (PO_4^{3-}), fluorure (F^-), hydroxyde (OH^-).

La présence Cl, NH₄, NO₂ est un indice de pollution pour un échantillon, ces éléments sont dits éléments anormaux.

Sur le bulletin d'analyse physico-chimique l'arsenie (As), le cyanure (Cn), le chrome (Cr) sont classés comme substances toxiques.

L'ensemble de la concentration de ces éléments ou leur rapport qui constitue les données chimiques.

III.2.2.1. Titre hydrotimétrique ou dureté totale (TH) et dureté calcique (TH Ca)

Le titre hydrotimétrique (TH), ou dureté de l'eau, est l'indicateur de la minéralisation de l'eau par la présence d'ion calcium et magnésium. L'unité utilisée pour la dureté de l'eau est le degré français. On distingue les catégories de la dureté de l'eau suivantes :

- dureté totale, correspondant à la présence des sels de calcium et de magnésium ;
- dureté permanente, correspondant à tous les composants à l'exception des bicarbonates de calcium et de magnésium ;
- dureté temporaire, correspondant à la teneur en bicarbonate de calcium et de magnésium.

La dureté calcique (THCa) correspondant à la teneur de l'eau en sels de calcium.

Tableau 8: Classification des eaux souterraines par rapport à la dureté

TH(°F)	0 - 7	7 - 15	15- 20	20 - 25	< 25
Eau	Douce, bonne	Faiblement salée	saumâtre	Limite de la salinité	Dure

III.2.2.2. Titre Alcalimétrique Complet (TAC) et titre Alcalimétrique (TA)

Le titre Alcalimétrique traduise l'alcalinité d'une eau. La connaissance de ces valeurs est essentielle pour l'étude de l'agressivité d'une eau puisqu'ils dépendent de l'équilibre calcocarbonique. Le TAC ou titre Alcalimétrique complet indique aussi l'alcalinité de l'eau. Il revient à neutraliser l'eau jusqu'à avoir $\text{pH} = 4,4$. Il exprime aussi la teneur en carbonates CO_3^- [mg/L], bicarbonates HCO_3^+ [mg/L] et alcalis libres de l'eau.

Le titre alcalimétrique (TA) permet de connaître les concentrations en bicarbonate, carbonate et éventuellement en hydroxyde (bases fortes) ainsi que les ions phosphatés contenus dans l'eau.

III.2.2.3. Les anions

a) Chlorure : Cl^- [mg/L]

La présence de chlorure en zone du socle peut être attribuée à des sources naturelles, à la pollution par les rejets urbains et industriels. Les éventuels inconvénients des chlorures sont la saveur et l'odeur désagréable qu'ils provoquent dans l'eau.

Tableau 9: Classification des eaux souterraines par rapport au chlorure

Qualité des eaux souterraines	Douce, bonne	Faiblement salée	saumâtre	Limite de la salinité	Limite de la salinité pour le bétail
Cl ⁻ (mg/l)	<150	150 à 500	500 à 700	700 à 1 000	1 000 à 2 500

b) Sulfate: SO₄ [mg/L]

La présence d'ion sulfate dans l'eau est d'origine naturelle, elle est reliée aux éléments alcalins et alcalino-terreux de la minéralisation. Sa consommation par les hommes peut entraîner des troubles gastro-intestinaux. La valeur maximale admissible pour une eau potable est de 250 mg/l.

Tableau 10: Classification des eaux souterraines par rapport au sulfate

Qualité des eaux souterraines	Douce, bonne	Faiblement salée	Saumâtre	Limite de la salinité	Limite de la salinité pour le bétail
SO ₄ ⁻⁻ (mg/l)	<150	150 à 180	500 à 1 200	700 à 1 400	1000 à 2500

III.2.2.4. Les cations

a) Calcium: Ca [mg/L]

Les ions calcium (Ca²⁺) d'une eau déterminent sa dureté. Elle est l'élément dominant des eaux potables. Il existe surtout à l'état de bicarbonate et, en quantité moindre, sous forme de sulfate et de chlorure. Le corps humain a besoin des apports quotidiens en calcium, provenant des boissons traités et des aliments. Par contre, si l'eau est trop incrustante, cela peut entraîner des inconvénients. La teneur en calcium dans l'eau potable est de :

- minimale : 75 mg/L ;
- souhaitable : 140 mg/L;
- maximale : 200mg/L.

b) Magnésium : Mg [mg/l]

Le Magnésium est un élément présent en grande quantité dans l'eau. Sa présence peut entraîner un goût désagréable à l'eau consommable. Il ne provoque pas de phénomène toxique mais les sels de magnésium ont un effet laxatif qui diminue avec l'accoutumance. L'interprétation du taux de magnésium dans l'eau doit se faire en liaison avec les sulfates. La concentration maximale admissible dans les eaux destinées à la consommation humaine est :

- tolérable en Mg^{2+} : 30 mg/l et sulfates : 250 mg/l ;
- teneur limite en Mg^{2+} : 125 mg/l.

c) Fer total : Fe [mg/l]

Le fer est un des métaux les plus abondants de la croûte terrestre. Il est présent dans l'eau sous trois formes: le fer ferreux Fe^{2+} , le fer ferrique Fe^{3+} et le fer complexé à des matières organiques et minérales.

Dans les eaux souterraines, au contraire, l'absence d'oxygène fait que le fer reste en solution. La présence du fer dans l'eau provient principalement du lessivage des sols avec une dissolution des roches et minéraux, des rejets industriels, de la corrosion des canalisations métalliques et de l'utilisation de sels ferriques comme coagulants. La présence du fer dans l'eau n'a aucun inconvénient au point de vue physiologique. La valeur limite en fer :

- souhaitable : 0,2 mg/l ;
- maximale : 0,3 mg/l.

III.2.2.5. Les composantes azotées

L'azote réduit se trouve sous deux formes dans l'eau : l'ion NH_4^{4+} , l'ammonium une forme non dissociée en milieu basique et l'ion NH_3^{3-} , l'ammoniac, un gaz peu soluble qui se dégage facilement dans l'atmosphère.

a) Ammonium: NH_4 [mg/l]

L'ion ammonium est la forme réduite de l'azote. Il provient principalement de la décomposition des protéines naturelles contenues dans le phytoplancton et les micro-organismes. Il peut être aussi issu de l'apport d'effluents urbains épurés, de rejets industriels ou agricoles. Il se trouve dans les eaux naturelles à des concentrations qui peuvent varier de 0,1 à plus de 10 mg/L. L'ion ammonium peut avoir des conséquences éco-toxicologiques mais il n'a pas d'effet

direct sur le consommateur, sa présence, en particulier dans les eaux de surface, peut être considérée comme un indicateur de pollution.

b) Nitrite: NO_2 [mg/L]

Le nitrite constitue la deuxième étape dans le cycle de l'azote: ammoniaque, nitrite et nitrate. Les nitrates proviennent habituellement de la nitrification de l'azote organique, mais il faut tenir compte de la teneur en ces éléments des terrains traversés.

Tableau 11: Grille pour signaler les problèmes d'Azote

Formes de l'azote (mg/l)	N0 Situation normale	N1 Situation modérée	N2 Situation nette	N3 Situation importante	N4 Situation excessive
NH_4^+	0.1	0.1 à 0.5	0.5 à 2	2 à 8	> 8
NO_2^-	0.1	0.1 à 0.3	0.3 à 1	1 à 2	> 2
NO_3^-	5	5 à 25	25 à 50	50 à 80	50 à 80

c) Nitrate: NO_3 [mg/L]

Le nitrate est la dernière étape du cycle où l'azote devient très gênant à partir des doses comme 50 mg/L. le meilleur moyen de les réduire est la dissolution par des changements réguliers d'eau.

III.2.3. Les données sous AquaChem

Les données utilisées sont données par les bulletins d'analyses physico-chimique de tous les échantillons d'eau prisent dans chaque points de forages après avoir fait l'essai de pompage des ouvrages. Elle est chargée par le JIRAMA.

Les résultats d'analyse des échantillons sont saisis dans un tableau sous Excel pour la création de base de données. Ce tableau contient toutes les données existantes et nécessaires pour la modélisation dans AquaChem.

Par exemple : Numéro d'identification du site, référence, coordonnées géographiques du point d'échantillonnages, les paramètres physiques et les paramètres chimiques. Après la virgule « , », les nombres décimales doivent êtres remplacés par des points « . », puis on doit enregistrer le fichier Excel sous type texte (separateur : tabulation) ou d'extension « .txt » pour pouvoir l'ouvrir dans AquaChem.

Comme cette étude se consacre pour le District de Maintirano, on donne ci-après les caractéristiques des points de forages positifs réalisés dans cette zone.

Tableau 12 : Les données physiques pour les 29 forages positifs dans le District de Maintirano

N	Référence	Conductivité	Aspet	Odeur	Turbidité	pH	Minéralisation	Dureté	TH Ca	TA	TAC	MO
1	MTR003	180	clair	absence	1,08	7,82	1340	30,2	20,3	0	18	0,6
2	MTR004	333	clair	absence	1,35	7,59	309	21,1	8,9	0	18,3	0,66
3	MTR005	964	clair	absence	1,01	8,2	1224	26	16,6	0	14,3	0,5
4	MTR006	288	clair	absence	1,76	7,69	267	16	13,5	0	14,3	0
5	MTR007	337	clair	absence	1,63	7,56	313	17,6	8,4	0	13,3	0,56
6	MTR008	320	limpide	absence	1,11	8,39	298	12	7,5	1,2	16,8	0,5
7	MTR009	110	limpide	absence	0,72	8,43	253	45,1	22,4	0	12,6	0,47
8	MTR011	2580	limpide	absence	1,17	8,13	2167	60,4	22	2	30,4	0,36
9	MTR013	2090	limpide	absence	2,5	8,29	1926	53,6	24,4	3,2	49	0,24
10	MTR018	528	limpide	absence	0,9	7,61	415	36,4	18,2	1,2	25,7	0,3
11	MTR019	1124	limpide	absence	0,69	8,56	933	20,8	6,8	0,4	20	0,3
12	MTR020	1055	limpide	absence	0,64	8,48	876	18,4	10	0,3	20	0,62
13	MTR021	2650	limpide	absence	0,78	8,3	2454	70,6	41	0,4	26,4	0,06
14	MTR022	1512	limpide	absence	1,17	8,34	1252	30	16	0,2	36,6	0,3
15	MTR023	1462	limpide	absence	1,23	7,93	1214	47	26	0	20,4	0,7
16	MTR024	1429	limpide	absence	1,38	7,9	1325	30,6	25,3	0	22,6	0,8
17	MTR027	831	limpide	absence	1,36	8,2	774	39,8	21,8	0,8	27,8	0,5
18	MTR028	2730	clair	absence	3,56	8,05	2158	89,2	50,2	1,4	18,4	0,1
19	MTR029	842	limpide	absence	1,21	7,89	384	20,5	9,4	2,6	20	0,52
20	MTR030	347	limpide	absence	1,54	8,24	321	14,8	8,9	0,6	15,1	0,9
21	MTRO32	633	limpide	absence	1,44	8,08	721	18,1	8,1	2	18,2	0,29

22	MTR034	252	limpide	absence	1,32	8,22	233	11,1	7,2	0,5	12,7	0,6
23	MTR036	550	limpide	absence	1,86 ²	8,16	509	19,9	9,5	1	18,4	0,32
24	MTR037	334	limpide	absence	1,62	8,38	310	7,5	3,5	0,7	18,6	1,9
25	MTR045	594	limpide	absence	1,8	8,53	342	18,9	10	0	14,8	0,4
26	MTR047	220	limpide	absence	1,77	8,52	206	5,6	2,1	0,3	9,6	0,08
27	MTR049	190	limpide	absence	1,01	7,51	78	3	1,9	0	4	0,3
28	MTR050	345	limpide	absence	0,69	7,84	320	14,1	7,2	0	17,6	0,4
29	MTR051	307	limpide	absence	1,58	7,92	367	17,6	8,3	0	13,8	0,26
Synthèse		110 à 2730	80% limpide	Absence	0,64 à 3,56	basique	78 à 2454	3 à 89,2	1,9 à 50,2	0 à 3,2	12,6 à 49	0 à 1,9

Tableau 13 : Les données chimiques pour les 29 forages positifs dans le District de Maintirano

N	Référence	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	NH ₄ ⁺	Fe ⁺⁺	CO ₃ ⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ⁻⁻⁻	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻
1	MTR003	60,1	38,1	120	0,11	0,2	12	240	426	12,3	0,12	0,79
2	MTR004	35,6	29,65	9,2	0,07	0	0	223,26	14,2	7,4	0,04	0,52
3	MTR005	67	30,3	76,3	0,14	0,2	21,3	231	353	16	0,09	0,61
4	MTR006	54	6,08	12,5	0,06	0	0	174	28,4	18,1	0,01	0
5	MTR007	33,6	22,4	8,53	0,07	0,02	0	162	28,4	6,03	0	0
6	MTR008	30	10,9	24,7	0,06	0	14,4	176	7,1	9,91	0	0
7	MTR009	82,2	61	212	0,17	0,2	4,6	318	280	26,5	0,11	0,64
8	MTR011	88	93,3	1072	0,22	0	24	322	1775	168	0	0,63
9	MTR013	97,6	71	575	0,11	0	38,4	520	888	146	0,16	0,88

10	MTR018	100,6	16,8	138	0,14	0,2	6,2	219	267	27,1	0	0
11	MTR019	27,2	34	132	0,17	0,02	4,8	234	204	17	0,05	0
12	MTR020	40	20,4	135	0,17	0,02	3,6	237	207	15,4	0,06	0
13	MTR021	164	71,9	442	0,17	0,02	4,8	312	682	40	0,05	0
14	MTR022	64	38,9	166	0,17	0,02	2,4	442	233	16,3	0,04	0,06
15	MTR023	104	51	227	0,15	0,02	0	249	351	15,8	0,04	0,5
16	MTR024	101	12,9	216	0	0	0	276	334	27,5	0	0
17	MTR027	87,2	43,7	20,4	0,14	0,02	9,6	320	118	22,1	0	0,88
18	MTR028	200,8	94,77	146,8	0,11	0,02	16,8	190	266,3	183	3	1,45
19	MTR029	25,8	22	193	0,14	0,2	8,1	222	209	34,2	0,05	0
20	MTR030	35,6	14,34	13,99	0,13	0	7,2	170	28,4	2,15	0	0,67
21	MTR032	43,3	9,82	12	0,06	0	0	182	14,4	7,1	0,04	0,34
22	MTR034	28,8	11,2	7,06	0,15	0	6	143	11,4	0	0	0,94
23	MTR036	38	20,4	27	0,12	0	12	200	44	15,8	0,01	0,72
24	MTR037	14	9,72	52,1	0,13	0	8,4	210	9,23	3,98	0,04	0,64
25	MTR045	38,9	22,16	23,7	0,08	0	0	166	21,6	10,3	0,06	0,56
26	MTR047	8,4	8,51	30	0,12	0,02	3,6	110	21,3	4,89	0,01	0,66
27	MTR049	7,6	0	0	0,15	0,02	0	49	5	4	0	1
28	MTR050	28,8	16,77	18,69	0,12	0,02	0	215	12,8	2,38	0,01	0,65
29	MTR051	35,6	28,4	18,5	0,07	0	0	179	22,9	8	0,03	0,66
Synthèse		7,6 à 200,8	8,51 à 94,77	7,06 à 442	0,06 à 0,22	0 à 0,2	0 à 38,4	49 à 520	5 à 1775	2,38 à 26,5	0 à 3	0 à 1

Et après avoir eu tous ces informations, on va passer aux analyses, traitements de ces données en utilisant des différents logiciels afin de nous permettre de faire la régionalisation de cette zone.

III.3. TRAITEMENTS ET INTERPRETATIONS

Les résultats du traitement des données sous AquaChem sont représentés sous forme de graphe (diagramme). L'objectif principal de la représentation graphique est de permettre une approche rapide des résultats analytiques en vue de caractériser facilement une eau, de suivre son évolution ou de la comparer à d'autres eaux de compositions physico-chimiques voisines ou de proximité géographique.

Des diagrammes particuliers ont été développés pour représenter les résultats d'analyses hydrochimiques et en tirer des renseignements particuliers. L'emploi de ces diagrammes s'avère précieux car il rend simple et directe l'interprétation des analyses. Toutefois, ces diagrammes n'emploient pas tous les éléments analysés, ils ne nécessitent que certains éléments.

Pour notre traitement, on a utilisé les diagrammes fondamentaux : Schoëller et Piper.

SampleID	Site	Geology	WTYPE	Index	#Group
mtr003			Na-Mg-Ca-Cl-HCO	0304	(02)
MTR004			Mg-Ca-HCO3	0283	(01)
mtr005			Ca-Na-Mg-Cl-HCO	0305	(05)
MTR006			Ca-HCO3-Cl	0284	(04)
MTR007			Mg-Ca-HCO3-Cl	0285	(01)
MTR008			Ca-Na-Mg-HCO3	0286	(04)
mtr009			Na-Mg-Ca-Cl-HCO	0306	(03)
MTR011			Na-Cl	0287	(03)
MTR013			Na-Cl-HCO3	0288	(03)
mtr018			Na-Ca-Cl-HCO3	0307	(03)
MTR019			Na-Mg-Cl-HCO3	0289	(03)
MTR020			Na-Ca-Cl-HCO3	0290	(03)
MTR021			Na-Ca-Mg-Cl	0291	(03)
MTR022			Na-Mg-Ca-HCO3-C	0292	(02)
MTR023			Na-Ca-Mg-Cl-HCO	0293	(03)
MTR024			Na-Ca-Cl-HCO3	0294	(03)
MTR027			Ca-Mg-HCO3-Cl	0295	(04)
MTR028			Na-Cl	0296	(03)
mtr029			Na-Cl-HCO3	0308	(03)
MTR030			Ca-Mg-HCO3-Cl	0297	(04)
MTR034			Ca-Mg-HCO3	0298	(04)
MTR036			Ca-Mg-Na-HCO3-C	0299	(04)
MTR037			Na-Mg-HCO3	0300	(02)
mtr045			Ca-Mg-Na-HCO3	0310	(04)
MTR047			Na-Mg-HCO3-Cl	0301	(02)
MTR049			Ca-HCO3	0302	(04)
MTR050			Ca-Mg-Na-HCO3	0303	(04)
mtr051			Mg-Ca-HCO3	0311	(01)
mtr032			Ca-Mg-HCO3	0309	(04)

III.3.1. Représentation graphique

III.3.1.1. Diagramme de Schoëller

A partir des valeurs des concentrations des éléments majeurs, le diagramme de Schoëller permet entre autres de reconnaître simplement le faciès, l'origine et le degré de minéralisation de l'eau, représenté sur la figure ci-après :

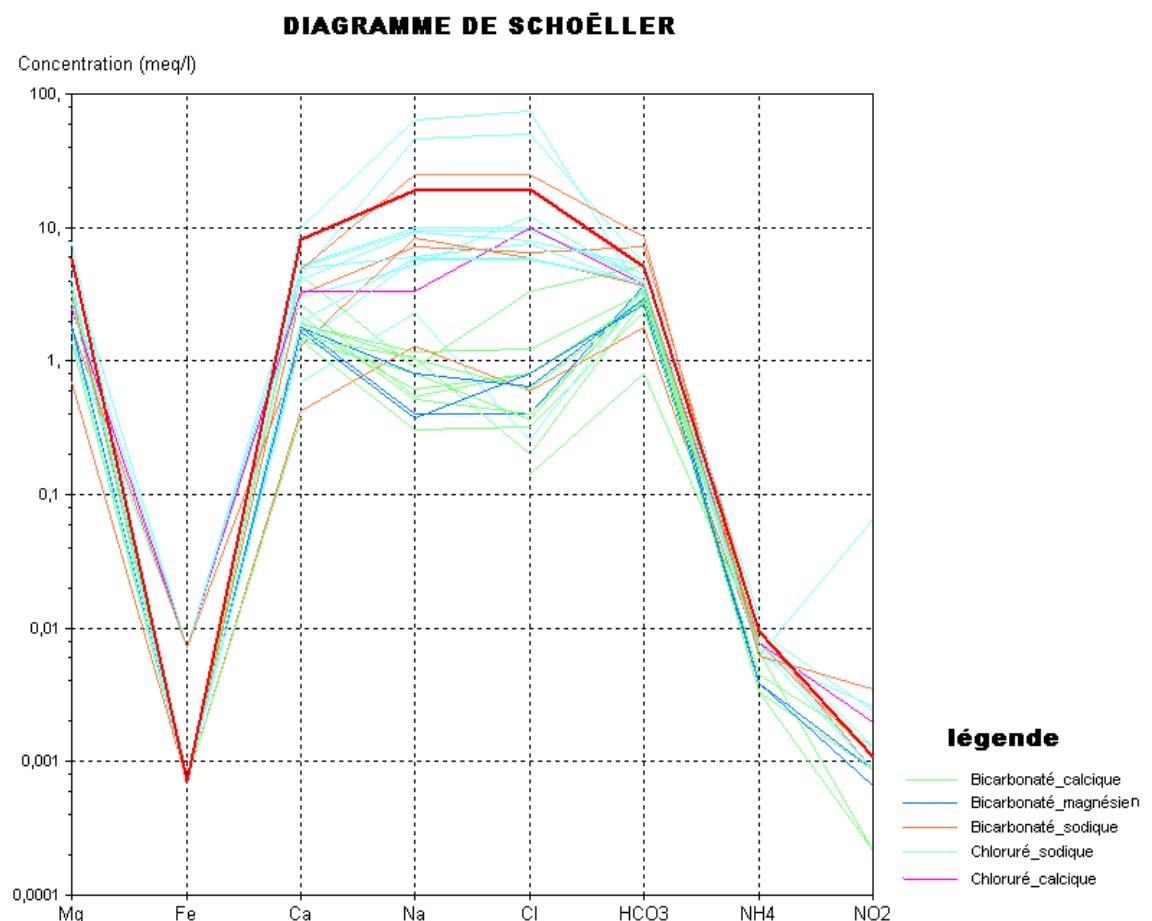


Figure 29 : Représentation des teneurs en ions sur le diagramme de Schoëller

D'après le diagramme de Schoëller, on a cinq (05) couleurs bien distinctes qui déterminent l'origine de chaque échantillon d'eau :

- vert : pour le faciès bicarbonaté calcique (HCO_3^- et Cl)
- bleu : pour le faciès bicarbonaté magnésien (HCO_3^- et Mg)
- orange pour le faciès bicarbonaté sodique (HCO_3^- et Na)
- bleu ciel pour le faciès chloruré sodique (Cl et Na)
- rose pour le faciès chloruré calcique (Cl et Ca)

En général, la nature de l'aquifère ou la formation encaissante donne le faciès de l'eau souterraine.

Les différents faciès de l'eau peuvent en conclure que le degré de minéralisation est variable. On a des échantillons de même faciès et de même origine mais le degré de minéralisation différent.

III.3.1.2. Diagramme de Piper

La forme du graphe est un des particularités de ce diagramme. Vue général, il a une forme de triangle isocèle mais si on le bien regardé, il est composé de deux petits triangles et un losange représenté par la figure ci-dessous.

Le diagramme de Piper utilise les éléments majeurs pour représenter les différents faciès des eaux souterraines. Il permet également de voir l'évolution de l'eau passant d'un faciès à un autre, grâce à des analyses espacées dans le temps ou des analyses d'échantillons prises à des endroits différents

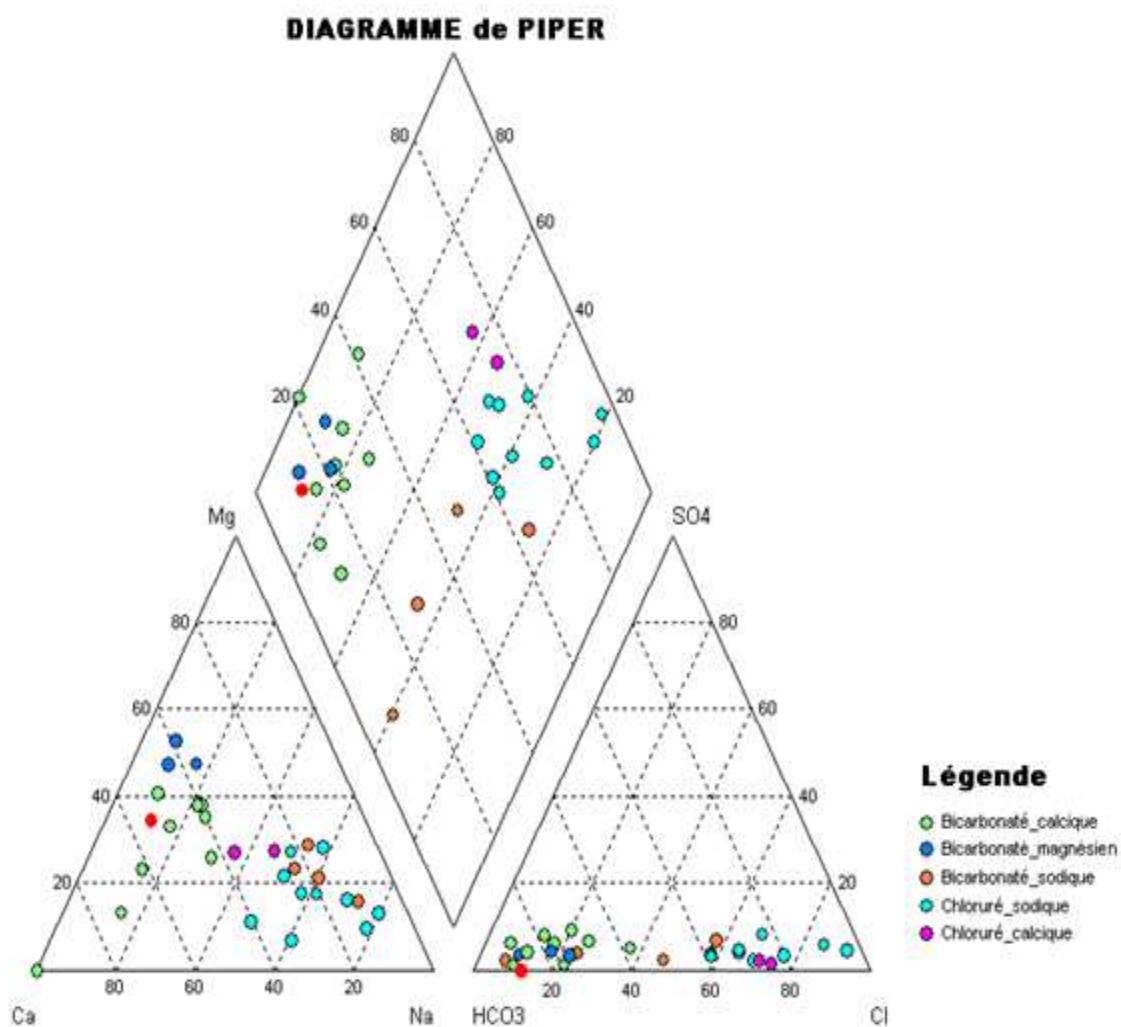


Figure 30 : Représentation des teneurs en ions sur le diagramme triangulaire de Piper

Cette deuxième diagramme qui est le diagramme de Piper nous permet de classer les eaux, leur faciès en fonction de la position des points d'échantillons dans les deux triangles d'anions et de cations, de même pour la synthèse d'anions et de cations dans le losange.

III.3.2. Interprétation des diagrammes

La composition chimique des eaux souterraine est majoritairement acquise lors de la traversée du sol et de son séjour dans le réservoir. L'eau, au contact de l'encaissant, acquiert une charge minérale caractéristique des roches traversées. Les éléments qui s'y trouvent en solution sont informatifs sur la nature de l'aquifère traversé.

A partir du diagramme de Piper, dans le triangle d'anion, la plupart des points se concentrent vers le pole HCO_3^- et celui de Cl^- d'où la présence du faciès bicarbonaté calcique sur la légende.

Dans le triangle de cation, la classification est un peu difficile, quelque points se concentrent dans la partie en bas à droite du triangle (à 20% de magnésium et entre 70 à 80% de Sodium). Et quelque point au centre à gauche du triangle (à 40% de Mg et 50 à 60% de Ca)

Alors, pour avoir le vrais faciès de ces échantillons, on doit voir la répartition dans le losange. On voit que les points se trouvent presque au centre du losange. Donc les échantillons qui se trouvent au centre gauche du losange appartiennent à la famille Sulfato_chlorurée calcique tandis que ceux qui se trouvent dans la partie droite sont dans la famille de Bicarbonatée calcique Magnésienne.

L'analyse des paramètres chimiques montre que les eaux de la nappe sont caractérisées par l'abondance des ions (Na^+ , Cl^- , Ca^{2+} , HCO_3^-), Le report des résultats des analyses des eaux sur le diagramme triangulaire de Piper (Figure 9), ce diagramme met en évidence l'incidence de la géologie sur la qualité des eaux, il permet aussi d'estimer les pourcentages des éléments chimiques et leur classification. Dans le diagramme des anions, on distingue que les points d'eau forment pratiquement deux grands groupes, proche du pôle chloruré et du pôle bicarbonaté. Les points au milieu du triangle ne présentent pas de dominance. La répartition spatiale de ces faciès chimiques dépend de la nature lithologique de l'aquifère.

Dans cette zone, en générale, le choix des roches aquifères est entre le grès et le basalte. Pour bien les définir, il faut voir le pH, si ce dernier est basique, on considère le basalte comme aquifère mais si le pH est acide, la roche encaissante est du grès.

Pour mieux comprendre le processus de minéralisation des eaux souterraines, nous avons représenté comme carte les teneurs des éléments majeurs dans le paragraphe suivant

III.4. ESSAIS DE REGIONALISATION DES DONNEES

Pour mieux comprendre tout ce qui se passe à l'intérieur du sous-sol, des essais de régionalisation ont été faits. Dans l'aquifère, il s'établit un équilibre entre la composition chimique de l'eau et celle des roches: l'eau prend une minéralisation qui demeure stable dans le temps et sert à caractériser un faciès hydrochimique.

On a choisi quelques paramètres pour faire la régionalisation du District de Maintirano. Le choix de ces paramètres se fait par sa domination, ceux qui ont décrit le faciès de l'eau lors du traitement par AquaChem. En générale, c'est la nature géologique du site qui détermine les compositions chimiques et les caractéristiques physique de l'eau.

Comme logiciel de traitement, on a utilisé un logiciel spécialisé pour le traitement des données chimiques et pour quelque données physiques (comme la carte niveau statique), appelé OASIS MONTAJ (ou GEOSOFT). Avec l'aide des logiciels SIG (MAPINFO, ARC VIEW ou ARC GIS) le traitement devient plus intéressant.

Par les figures ci-après, on va essayer de montrer la relations entre les différentes paramètres tels que nature géologique du lieu et la composition physico-chimique de la nappe, les liaisons entre les ions présentent dans les échantillons, ainsi que la topographie et le niveau statique.

En hydrochimie, il a toujours des liaisons entre la teneur en ion bicarbonate, de magnésium et celle de calcium surtout dans la zone calcaire. Mais aussi entre le chlore et la Sodium. Il faut donc avoir des cartes plus ou moins semblables pour ces éléments. Avec les figures ci-dessous , on va essayer des comparaisons pour pouvoir vérifier et confirmer ces théories.

III.4.1. La conductivité électrique

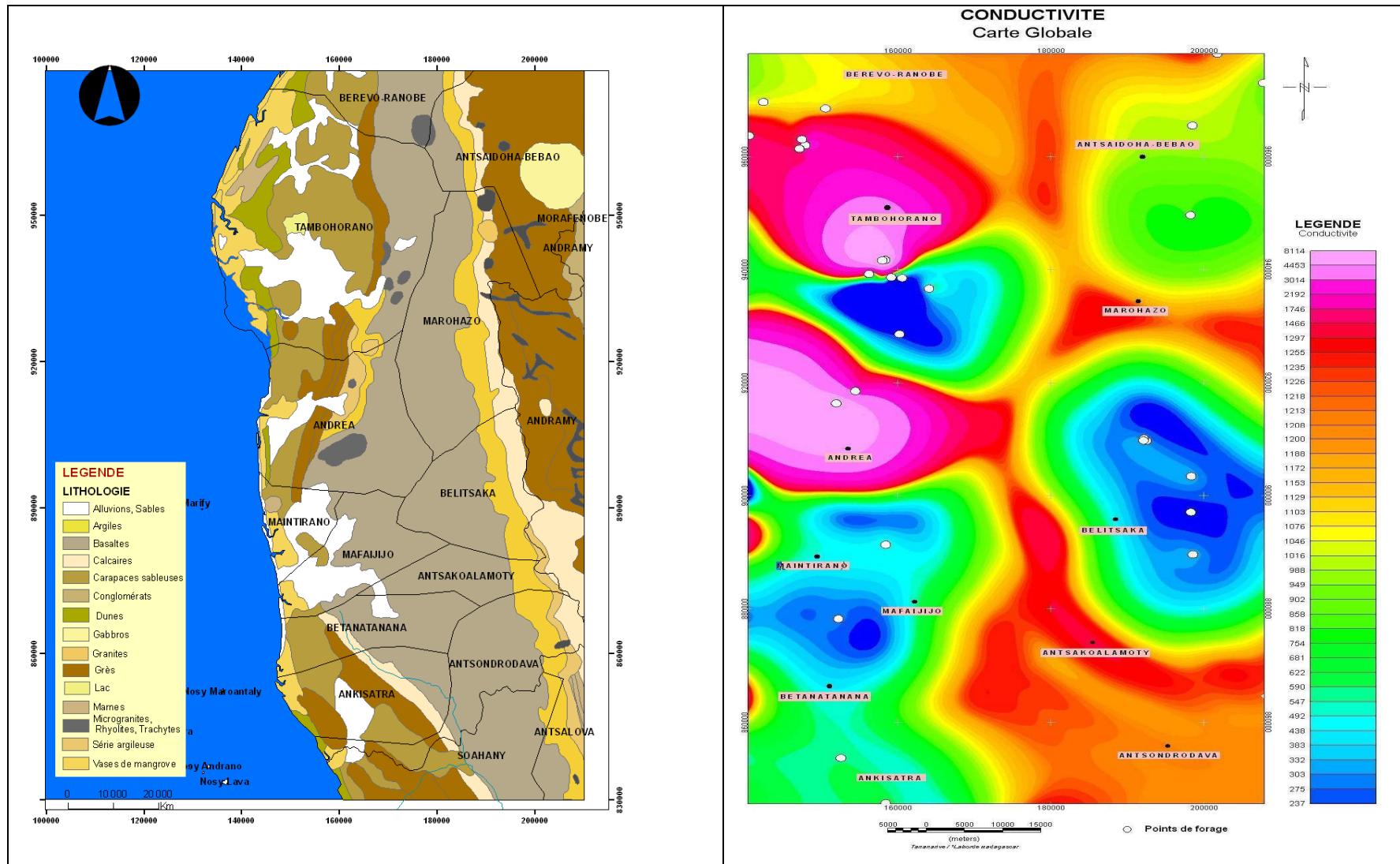


Figure 31 : Régionalisation de la conductivité électrique

La conductivité de l'eau est liée à la minéralisation, c'est-à-dire que plus l'eau est minéralisée plus la conductivité augmente.

Généralement, les eaux souterraines sont plus ou moins minéralisées en fonction:

- * de la nature des roches traversées et des minéraux rencontrés au cours de l'infiltration;
- * du temps de contact de l'eau avec les minéraux, donc de la vitesse de percolation de l'eau dans le sous-sol;
- * du temps de renouvellement de l'eau de la nappe par l'eau d'infiltration.

On voit l'importance des minéraux solubles des roches et de la perméabilité de l'aquifère dans la minéralisation de l'eau

Sa valeur élevée est due à la forte concentration en Na Cl en donnant un goût salé ou par l'échange de base avec les argiles et/ou les marnes

D'après le tableau montrant le rapport entre la Conductivité et la Minéralisation (Tableau7), on constate que la conductivité varie de 230 à 30018 μ S/cm pour le District de Maintirano.

La figure ci-dessous (Figure n°10) nous montrera la répartition de la conductivité dans la zone d'étude. Avec cette même figure, nous pouvons diviser en quatre catégories :

- minéralisation moyenne ($230\mu\text{S}/\text{cm} < C < 590\mu\text{S}/\text{cm}$): représenté par la couleur bleue dans la carte;
- minéralisation moins élevée ($590 \mu\text{S}/\text{cm} < C < 988 \mu\text{S}/\text{cm}$): représenté par la couleur verte;
- minéralisation élevée ($988 \mu\text{S}/\text{cm} < C < 1220 \mu\text{S}/\text{cm}$): représenté par la couleur jaune
- Minéralisation très élevée ($C > 1220 \mu\text{S}/\text{cm}$): de couleur rouge à rose.

Cette relation entre la conductivité et la minéralisation vérifie la variation de degré de minéralisation au niveau de chaque échantillon dans le diagramme Schoëller.

Dans les terrains sableux et gréseux -c'est à dire riche en minéraux siliceux et silicatés - les eaux sont douces: elles sont peu minéralisées mais acides et agressives pour les conduites.

Dans les réservoirs calcaires, les eaux sont dures, moyennement à fortement minéralisées en sels de calcium et magnésium; elles entartrent les conduites, l'eau peut se charger de particules argileuses en suspension au cours des fortes pluies.

En bordure de mer, les aquifères peuvent être en contact avec l'eau de mer: échange au niveau du biseau salée, contamination de l'eau d'infiltration par les embruns salés. L'eau de la nappe devient plus ou moins saumâtre. L'invasion de la nappe d'eau douce par l'eau salée est accélérée par les pompages et le rabattement de la nappe

III.4.2. Liaison calcium et magnésium

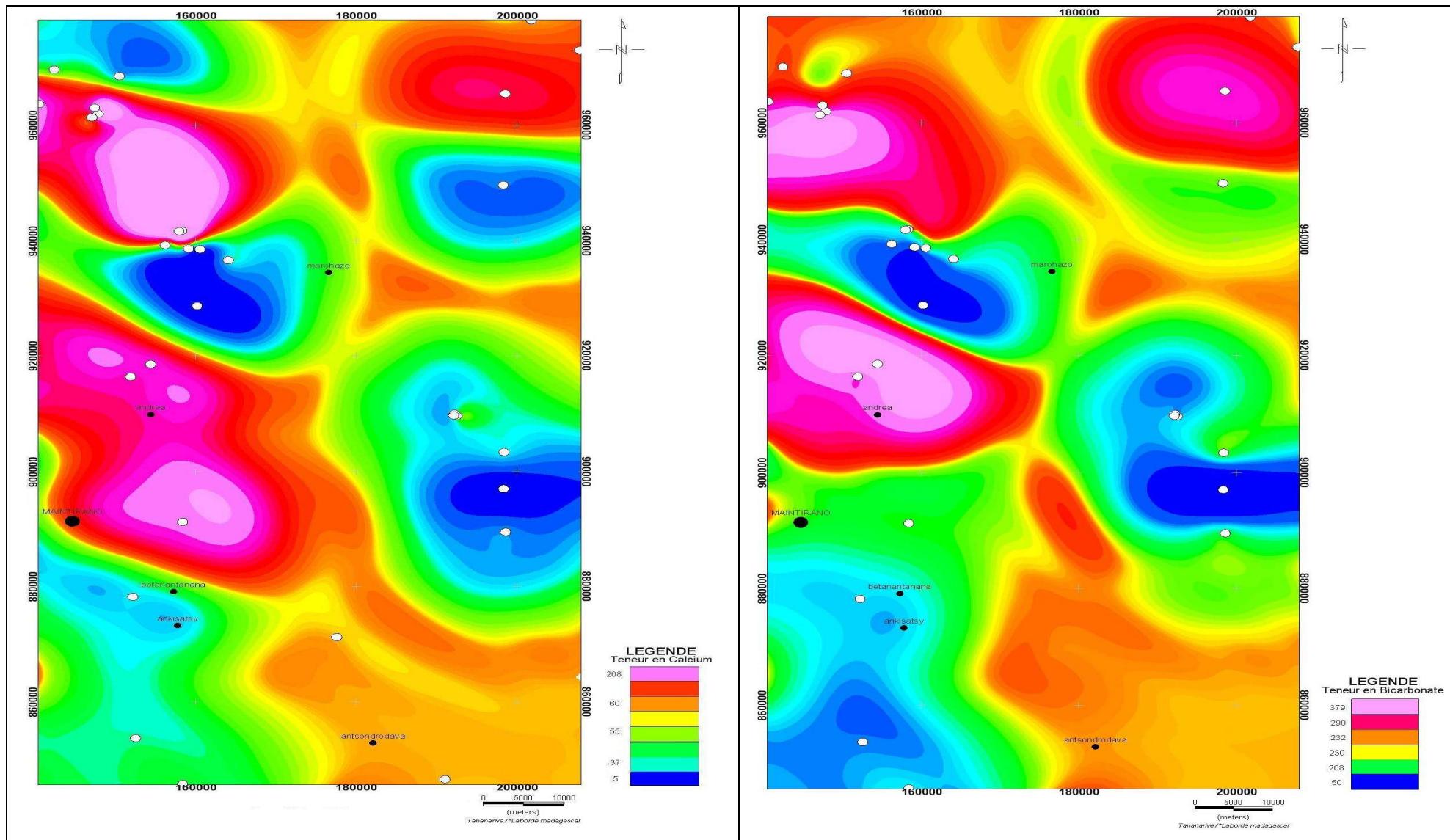


Figure 32 : Comparaison entre la carte de calcium et magnésium

III.4.3. Liaison entre l'ion bicarbonate et l'ion magnésium

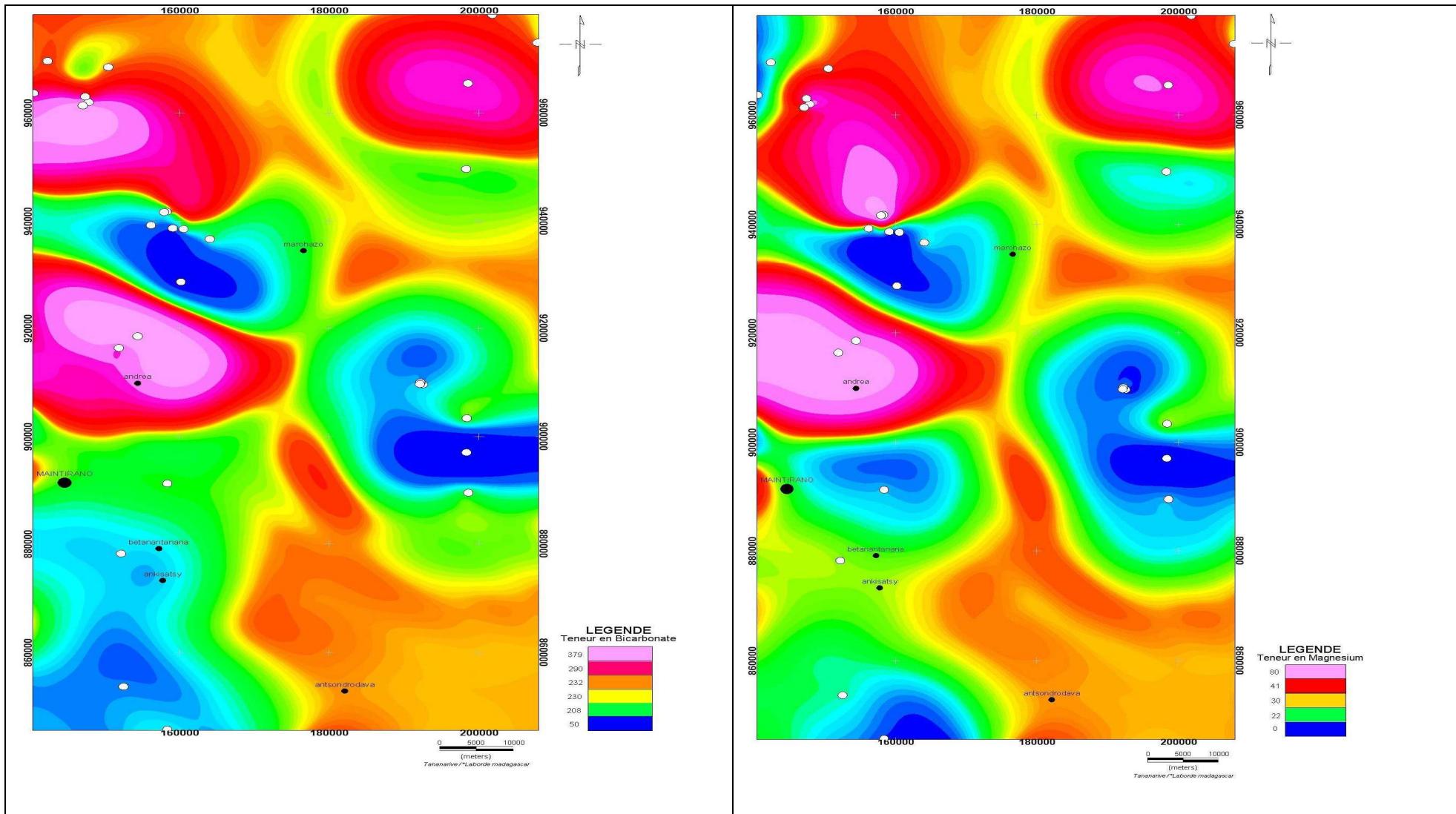


Figure 33 : Comparaison entre la carte de teneur en ion bicarbonate et celle de magnésium

III.4.4. Liaison entre l'ion chlorure et l'ion sodium

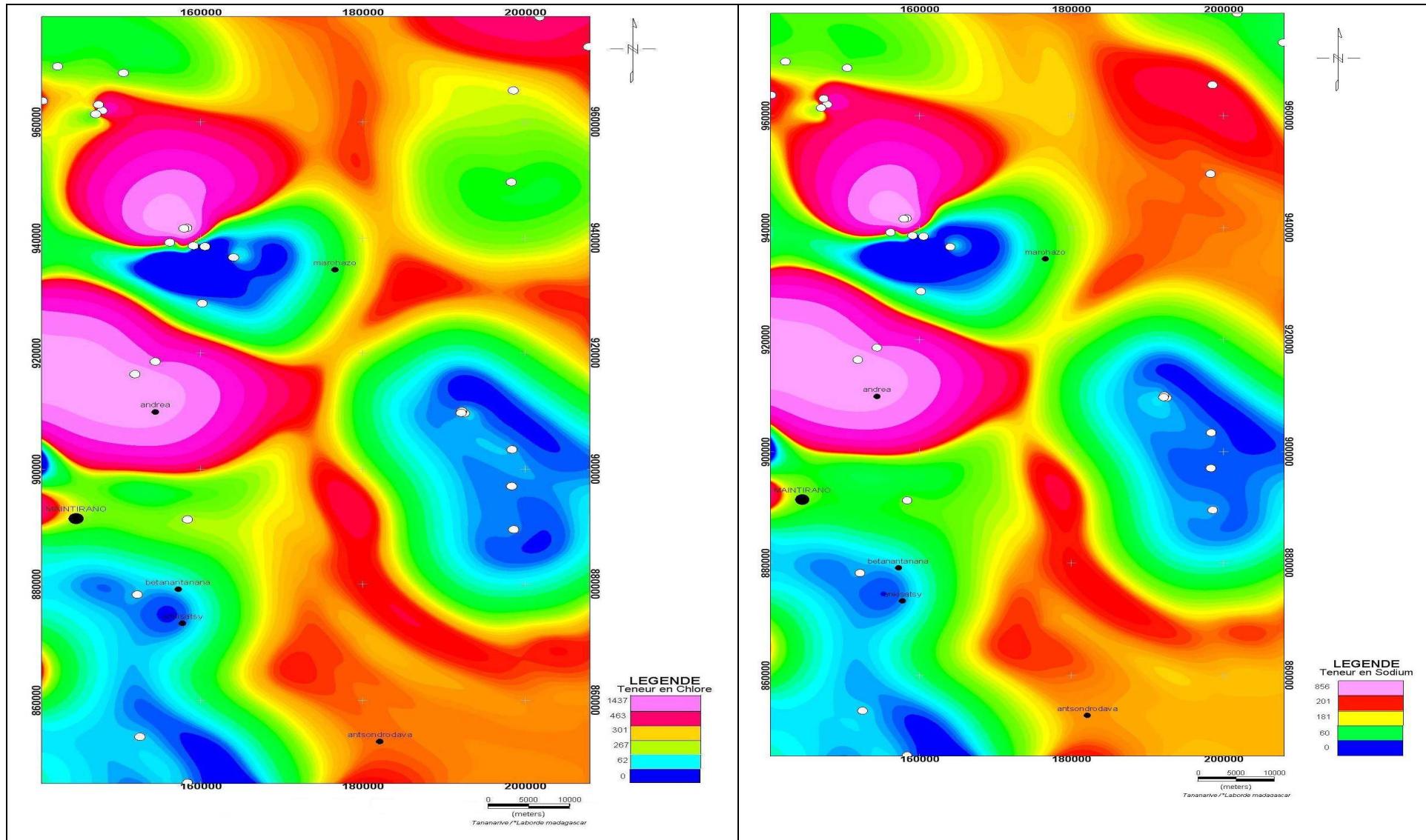


Figure 34 : Comparaison entre la carte de chlore et sodium

III.4.1. Régionalisation des niveaux statiques

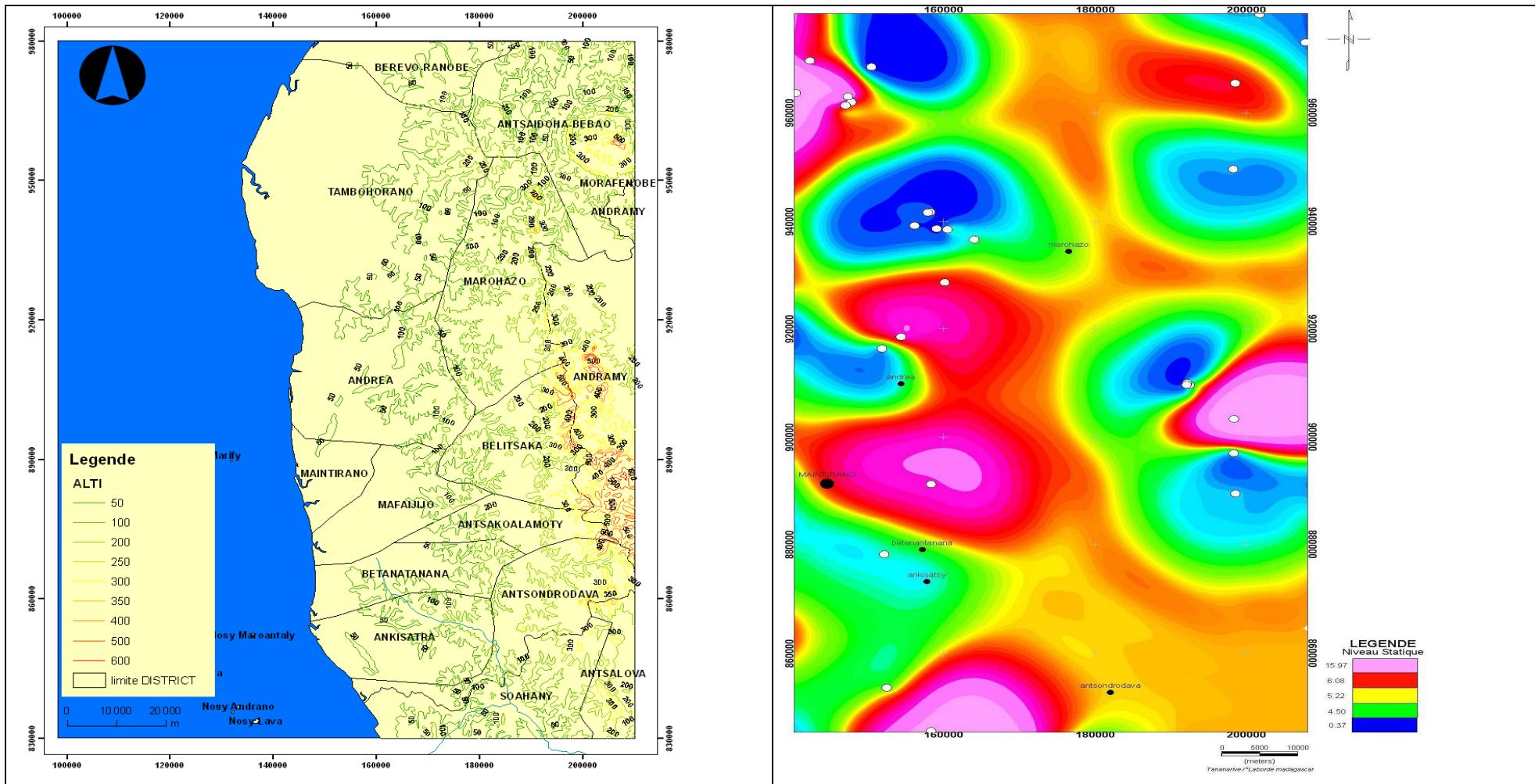


Figure 35 : Variation des niveaux statiques dans le District de Maintirano

L'étude du chimisme des eaux a pour but d'identifier les faciès chimiques des eaux, leur qualité de potabilité. Elle permet de suivre aussi l'évolution spatiale des paramètres physico-chimiques et d'estimer leur origine en les corrélant avec la géologie

Les cartes ci-dessus indiquent la variabilité et l'ordre de grandeur des différents paramètres physico-chimiques des eaux souterraines à l'échelle de tout le secteur étudié.

Les analyses des paramètres physico-chimiques montrent des valeurs moins élevées de la conductivité électrique avec deux groupes d'éléments chimiques.

La richesse des eaux en éléments Na^+ , Cl^- , Ca^{2+} et SO_4^{2-} est liée à la dissolution des minéraux susceptibles de se former par évaporation des eaux chargées de sels et par dissolution des formations évaporitiques. Par contre les éléments Ca^{2+} , Mg^{2+} et HCO_3^- sont liés à la dissolution des carbonates.

Globalement la variation de la minéralisation est liée essentiellement aux chlorures et au sodium, les eaux les plus chargées en sels sont les plus chlorurées sodiques.

Pour le magnésium, elle varie de 10 à 98mg/l. La couleur rose sur la carte de teneur en magnésium indique l'abondance de cet élément tandis que la couleur bleue colore la zone à faible teneur en magnésium. Cette valeur est donc plus élevée dans la Commune de Tambohorano, d'Andrea et d'Antsaidoha-bebao (supérieure à 40mg/l) . Elle est suffisamment faible dans le Commune d'Antsondrondava, et pour le reste, la teneur en magnésium est très faible comme la Commune de Maintirano, de Betanatana, d'Ankisatra, d'Antsakalamoty et d'Antsondrondava.

Sur la carte géologique, l'aquifère dans la partie Sud de Maintirano est formée généralement par du basalte tandis que pour la partie Nord, la nappe est encaissée dans du grès ou du gneiss d'où la différence à l'intérieur de cette zone.

Pour la variation du niveau statique (figure 35), on constate que la variation du niveau statique correspond à la variation d'altitude compte tenu de la topographie La valeur du niveau statique varie de 1 à 12m de profondeur. On peut alors dire que le niveau statique est parallèle à la côte.

:

CONCLUSION

D'après les résultats obtenus lors de cette étude, on constate qu'en hydrogéologie, la géologie joue un rôle très important pour l'identification de l'existence ou non d'un aquifère, la nature de la nappe, la productivité de la nappe, et aussi la caractérisation chimique de l'eau. Dans cette région, l'aquifère est généralement constitué soit par du grès soit par du basalte ou du gabbro. Le toit de la nappe est presque imperméable, parfois semi-perméable dont la nappe est captive ou semi-captive. Le niveau statique se trouve entre 2m à 10m allant de la surface, le débit de 0,6 (MTR008) à 80m³/h (MTR024). L'existence d'un réseau hydrographique relativement dense, favorise la productivité de la nappe, les débits sont vraiment importants, ceux-ci étaient vérifiés lors de l'essai par pompages par le nombre de palier effectués. La variation du niveau statique (ou niveau piézométrique) entre les ouvrages de captage est liée à la variation de l'altitude ou à la topographie variée de cette zone.

Pour la qualité de l'eau souterraine, à part de la formation géologique qu'elle encaisse, il y a encore d'autres facteurs qui la déterminent. Sur la zone littorale, on a vu précédemment des valeurs plus élevés en terme de conductivité (allant jusqu'à 7730µs/cm pour MTR028) ; Cela peut être dû soit à l'évaporation, soit à l'intrusion marine en plus des activités de la population qui pourraient contaminer directement ou indirectement la nappe phréatique (pâturage, agriculture par l'utilisation des engrains, pesticides, ou autres produits chimiques). Toutefois le pH varie entre 7,51 et 8,48, ce qui indique que ces eaux sont légèrement basiques.

En hydrochimie, par l'utilisation du logiciel AquaChem nous permet de représenter chaque échantillon d'eau sur les deux diagrammes : le diagramme de Piper et celui de Schoëller a fin de tirer des conclusions sur la qualité physicochimique des eaux. A partir de ces diagrammes, on sait l'origine de ces eaux analysées avec leurs faciès. Sur le losange dans le diagramme de Piper, les points se répartirent en deux grands groupes qui indiquent les faciès des échantillons qui sont le faciès bicarbonaté calcique, et le faciès bicarbonaté magnésien, mais on y trouve aussi de faciès intermédiaire représenté par les points situés au centre du losange.

Les cartes ont été élaborées pour illustrer cette régionalisation des données qui sont fragmentaires par rapport à l'étendue de la zone et leur utilisation directe mérite des précautions.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES ET WEBOGRAPHIQUES

1. ANDRIANAIVO T., 2008, Analyse de la situation hydrogéologique d'un site sis à Ambohitratenaina, Commune Rurale de Talata Volonondry. Mémoire de fin d'Edute MSTGA, Faculté des Sciences, Université d'Antananarivo.
2. CHAPERON P., DANLOUX L., FERRY L. (1993) : Fleuves et rivières de Madagascar, Edit. ORSTOM.
3. CASTANY G. (1982) : Principes et méthodes de l'hydrogéologie, Edit. Dunod. Univ. de Paris, 238 p.
4. FEHDI- Chemseddine, FEHDI- Chemseddine, Caractérisation hydrogéochimique des eaux souterraines du complexe aquifère Morsott-Laouinet (Région Nord de Tébessa, Sud-Est algérien).
5. ELOUARD J – M. et ANDRIATSIFERANA M. (1992) – Actes des Journées de l'eau, 306p.
6. IHANTAMALALA H. F. A. (2010) – Essai de modélisation hydrochimique par bassin : cas du Haut Bassin Versant de la Menandra, Région Androy, Sud de Madagascar. Mémoire de fin d'étude MSTGA. Univ. d'Antananarivo, Faculté des Sciences, 41p.
7. Manuel de procédure pour la mise en place des projets Eau et Assainissement (2005) – Crédit N°3025 MAG /Contrat N°05-04, MEM/PAEPAR/BP/AEPG, 164p.
8. MOHAMED A. (2007) – Etude hydrogéologique et hydrochimique des eaux souterraines de la Région de Betroka. Mémoire DEA, Univ. d'Antananarivo, ESPA,
9. Monographie de la Région Melaky (2008), 156p.
10. RABEMANANA V., 1997, Etude hydrogéologique des ressources en eau dans l'extrême sud de Madagascar : apport de la modélisation, DEA Hydrologie, hydrogéologie, géostatistique et géochimie, Univ. Pierre et Marie Curie, Ecole des Mines de Paris & Ecole Nationale du Génie Rural des Eaux et Forêts.
11. RANDRIANILAINA H., 2009, Modélisation des données hydrochimiques de la Région Menabe avec AquaChem, Mémoire de DEA, ESPA, Université d'Antananarivo, 106p.
12. RAKOTO H.A. (1994) – Application de l'approche bayésienne dans l'inversion des données électriques acquises à Ankadifotsy (Mahitsy) et à Tritrivakely. Mémoire de DEA, Univ. d'Antananarivo. 30p.
13. RAKOTONDRABE M. H. (2010) – Apport de l'hydrochimie dans l'étude de vulnérabilité des ressources en eau de la plaine d'Antananarivo. Mémoire de fin d'étude MSTGA. Univ. d'Antananarivo, Faculté des Sciences, 41p.

14. RAKOTONDRAINIBE J H (1985) – Les huit zones hydrogéologiques de Madagascar (Mis à jour 2005).
15. RALAIMARO J. (2004) – Compréhension de la structure et du fonctionnement des aquifères par divers approches scientifiques en vue de l'alimentation en eau potable, en zone de socle altéré des Hautes Terres centrales et en zone sédimentaire du sud- ouest de Madagascar. Thèses de Doctorat de 3eme Cycle. ESPA. Université. d'Antananarivo. 235p.
16. RAONIMAHARIVO R. R. M. – Etude hydrogéologique et hydrochimique des eau souterraine de la Région SAVA. Mémoire de DEA, ESPA, Université d'Antananarivo, 68p.
17. SOPHIA A. (1982) – Synthèse des connaissances sur l'hydrogéologie du socle cristallin et cristallophylien et du sédimentaire ancien de l'Afrique de l'Ouest. 121p.
18. SCHOËLLER H. (1964) : La classification géochimique des eaux. Assemblée générale de Berkley du 19 au 31 Septembre 1963, 16-22 pp.
19. www.aquachem.com (Août 2011)
20. www.ecoconsommation.org (Juillet 2011)
21. www.geo-hydrology.com (Août 2011)
22. www.mineau.gov.mg (Juillet 2011)
23. www.pseau.org / www.pedag-eau.fr (Septembre 2011)
24. www.unicef.org (Septembre 2011)

ANNEXES

Annexe 1 : Norme de potabilité des eaux

(Décret n°2004-635 du 15/06/04, République de Madagascar)

PARAMETRES ORGANOLEPTIQUES	NORME
ODEUR	ABSENCE
COULEUR	INCOLORE
SAVEUR DESAGREABLE	ABSENCE

PARAMETRES PHYSIQUES	SYMBOLE	UNITE	NORME
TEMPERATURE	T°	°C	<25
TURBIDITE	Turb	NTU	<5
CONDUCTIVITE	Cond	µS/cm	<3000
POTENTIEL HYDROGENE	pH		6,5 - 9,0

PARAMETRES CHIMIQUES	SYMBOLE	UNITE	NORME	
			MINIMA	MAXIMA

ELEMENTS NORMAUX

CALCIUM	Ca	mg/L		200
MAGNESIUM	Mg	mg/L		50
CHLORURE	Cl	mg/L		250
SULFATE	SO ₄	mg/L		250
OXYGENE DISSOUS % de saturation	O ₂ dissous	%	75	
DURETE TH	TH	mg/L en CaCO ₃		500

ELEMENTS INDESIRABLES

MATIERES ORGANIQUES	MO	mg/L		2 (milieu Alcalin) 5 (milieu Acide)
AMMONIUM	NH ₄	mg/L		0,5
NITRITE	NO ₂	mg/L		0,1
AZOTE TOTAL	N	mg/L		2
MANGANESE	Mn	mg/L		0,05
FER TOTAL	Fe Tot	mg/L		0,5
PHOSPHORE	Ph	mg/L		5
ZINC	Zn	mg/L		5
ARGENT	Ag	mg/L		0,01
CUIVRE	Cu	mg/L		1
ALUMINIUM	Al	mg/L		0,2
NITRATE	NO ₃	mg/L		50
FLUORE	Fe Tot	mg/L		1,5
BARYUM	Ba	mg/L		1

ELEMENTS TOXIQUES

ARSENIC	As	mg/L		0,05
CHROME TOTAL	Cr Tot	mg/L		0,05
CYANURE	CN	mg/L		0,05
PLOMB	Pb	mg/L		0,05
NICKEL	Ni	mg/L		0,05
POLYCHLORO-BIPHENYL PCB		mg/L		0
CADMIUM	Cd	mg/L		0,005
MERCURE		mg/L		0,001

Source : JIRAMA

Annexe 2 : NORMES DE POTABILITE DES EAUX RECOMMANDES PAR L'OMS

Catégories	Caractéristiques	Symbol e	Unités	Eaux souterraines
Caractères physico-chimiques et organoleptiques	Température	T°	°C	7 - 25
	Couleur	Coul	U-Pt	0 - 20
	Turbidité	Tu	g/m ³	0 - 20
	Goût, odeur		seuil	1 - 4
	Pouvoir colmatant	Po	L	0.01 - 1
	pH	pH		5.5 - 8
	Résistivité	R	Ko/cm	1 - 5
	Dissolution O ₂		mg /l	> ou = 5
Examen préliminaire	Minéralisation			
	Dureté total	TH	°F	0 - 60
	Alcalinité	TAC	°F	0 - 40
Signes de pollution	Matière organique en milieu alcalin	MC	mg/L	0 - 3
	Azote ammoniacal	NH ₄	mg/L	0 - 1
	Azote nitreux	NO ₂	mg/L	0 - 0.5
Éléments toxiques ou indésirables	CO ₂ aggressive	CO ₂	mg/L	0 - 100
	Fluorures	N	mg/L	0 - 10
	Chlorures	Cl	mg/L	0 - 500
	Sulfates	SO ₄	mg/L	0 - 500
	Nitrates	NO ₃	mg/L	0 - 20
	Cyanures	CN	mg/L	0
	Chromates	CrO ₄	mg/L	0
	Chlores libres	Cl	mg/L	0
	Silice	SiO ₂	mg/L	0 - 80
	Phénols		mg/L	0
Cations	Sodium	Na	mg/L	Liés à SO ₄ et Cl
	Potassium	K	mg/L	
	Magnesium	Mg	mg/L	0 - 200
	Calcium	Ca	mg/L	0 - 200
	Fer	Fe	mg/L	0 - 10
	Cuivre	Cu	mg/L	0
	zinc	Zn	mg/L	0
	Aluminium	Al	mg/L	0 - 5
	Plomb	Pb	mg/L	0
	Arsenic	As	mg/L	0
	Sélénium	Se	mg/L	Traces
	Uranium	U	mg/L	Traces
Qualité bactériologique	Manganèse	Mn	mg/L	0-5
	Coliformes totaux			10/100
	Coliformes fécaux			Absence dans 100mL

Sources : Acte des journées de l'eau 16-20 Nov 1992 Qualité de l'eau

Annexe 3 : Tableau de localisation des 29 points de forage dans le District de Maintirano

N	Référence	X	Y
1	MTR003	201 778	978 180
2	MTR004	198 379	903 382
3	MTR005	207 809	973 013
4	MTR006	192 522	909 644
5	MTR007	192 193	910 025
6	MTR008	192 123	909 701
7	MTR009	198 547	965 477
8	MTR011	151 900	916 388
9	MTR013	154 408	918 557
10	MTR018	158 379	891 315
11	MTR019	150 500	968 496
12	MTR020	142 379	969 633
13	MTR021	147 869	961 995
14	MTR022	147 086	961 385
15	MTR023	147 415	963 038
16	MTR024	140 511	963 669
17	MTR027	158 296	941 743
18	MTR028	157 947	941 658
19	MTR029	198 286	949 644
20	MTR030	156 208	939 247
21	MTR034	159 115	938 671
22	MTR036	164 062	936 667
23	MTR037	160 532	938 534
24	MTR045	152 522	853 685
25	MTR047	160 186	928 618
26	MTR049	198 343	897 052
27	MTR050	198 585	889 585
28	MTR051	152 193	878 230
29	MTRO32	158 379	845 719

Annexe4 : Modèle rapport de chantier par forage

PAEAR Volet 1250 forages		COUPE DE FORAGE			CTRL : 2
N°Idt : MTR 003	PROJET D'HYDRAULIQUE VILLAGEOISE				
Coord Lat : $17^{\circ}58'46.5''$ Long : $44^{\circ}25'55.1''$ Entreprise : REVAFORAGE Foreur : SALLAH D. WILLIAMS Contrôleur : ADINANE Oumar Date début : 05/12/09 Date fin : 05/12/09	Diam. forage : $\Phi 10''$ et $\Phi 6\frac{1}{2}''$ Tubage aveugle (ml) : 27,1 Tubage crépine (ml) : 8,55 Gravier (ml) : 20,65 Tout venant (ml) : 14,38 Débit fin forage : $\geq 45 \text{ m}^3/\text{h}$ Débit fin soufflage : $\geq 40 \text{ m}^3/\text{h}$ Durée du soufflage : 30mn	Région : NELAKY District : Montirano Commune : Belitaka Fokontany : Belitaka Village : Belitaka E			
COUPE TECHNIQUE					COUPE GEOLOGIQUE
Vitesse d'avancement (m/h)	Prof V.e (m)	Débit cumul / Cond. (m ³ /h) / $\mu\text{S}/\text{cm}$	EQUIPEMENT	Prof (m)	LITHOLOGIE
10 20 30 40				0 10 20 30 40 50 60	Coverteure latéritique Pouzzolane Basalte Grès Grès avec Basalte Basalte Grès à sable basaltique Grès fracturé
Observations : $P_f = P_g = 36,65 \text{ m}$ l'entreprise ne possède pas une sonde électrique conductivité fin soufflage = $130 \mu\text{S}/\text{cm}$					

Signature du contrôleur :

ADINANE Oumar

Signature de l'hydrogéologue (Entreprise) :

Groupement TECSULT - SGDM - TECMAD

Code site : 172003	Atelier :	Entreprise : REVAFORAGE
Village : Belibaka E	Commune : Belibaka	District : Hauteirane
DATES : 05/12/09		Région : TELAKY

Description des conditions météorologiques : bonne

CHRONOLOGIE DES ACTIVITES DE TRAVAUX DE FORAGE

DATE	heures	Description
05/12/09	9 ^h 00	Installation du machine
	10 ^h 25	Début du forage
	11 ^h 02	pose tubeage provisoire
	11 ^h 15	Continuation du forage
	14 ^h 12	fin du forage et équipement à 15 ^h 30
	16 ^h 00	fin du forage

Travaux réalisés pour ce forage	Forage à boue	Forage à l'air	Equipement
Mètres linéaires réalisés	niary = 4,10	MF = 32,55	10 + 30 + 9L

PERSONNEL PRESENT SUR LE CHANTIER

Fonction	Nom	Observation
Hydrogéologue	Henry Tiana	
Chef foreur	Sallah et Z. William	
Aide foreur	Raytin	
Maneuvres	Zohilaby, Zohé, Tamare, Julien	
Contrôleur	ADIANANE Omar	
Autres		

ENTRÉE ET SORTIE DES MATERIAUX

Désignation	U	Entré	Sortie
		/	

EVENEMENTS SUR MATERIELS ET EQUIPEMENTS

OBSERVATIONS COMPLEMENTAIRES	

Pour le bureau d'étude, le Contrôleur

SIGNATURES

ADIANANE Omar

Pour l'Entreprise, l'hydrogéologue

Henry Tiana

RÉSUMÉ DES QUANTITÉS DES TRAVAUX REALISÉS

Entreprise : REVAFORAGE

Date : 05/12/09

Village : Belitabaka

Forage N°:

Code Village : 1172003

N°	DESIGNATION DES OUVRAGES	Unité	Quantité
Poste 200 – Réalisation des forages			
201	Installation et décapage de la zone	Unité	
202	Forage au Rotary	ml	4,10
203	Forage au marteau fond de trou	ml	32,55
Poste 300 – Equipement			
301	Fourniture et pose de tubage aveugle	ml	27,10
302	Fourniture et pose de tubage crépiné	ml	8,55
303	Fourniture et pose de tubage à sédiment	Unité	1,00
304	Fourniture et pose de massif filtrant	ml	20,65
305	Cimentation et margelle	Unité	/
Poste 400 – Développement et Essais de débit			
401	Développement et essais de débit	Unité	/

Annexe 5 : Modèle fiche de pompage

Annexe 6 : Modèle fiche d'analyse de JIRAMA

JIRO SY RANO MALAGASY
B.P. 200 - ANTANANARIVO

PROFORMA : 104

DIRECTION DE L'EXPLOITATION EAU
DEPARTEMENT QUALITE EAU
Tél. (261 20) 22 221 92

BULLETIN D'ANALYSE PHYSICO-CHIMIQUE N° 1111 /10

PRELEVEMENT

Région : AMBOROKOTSY EST
Centre :
Nature : Eau brute
Type d'échantillon : CGC N° MTR 006

ANALYSES

Paramètres	Examen au Laboratoire	V M A N.M.
Aspect	clair	limpide
Odeur	absence	absence
Couleur		incolore
Température, en °C	17,6	25
Turbidité, en NTU	1,76	5
pH	7,69	6,5 - 9,0
Conductivité à 20%, en $\mu\text{s/cm}$	288	3000
Minéralisation, en mg/l	267	
MeS en mg/l		

Cations	mg/l	V M A N.M.
Calcium Ca ⁺⁺	54,00	
Magnésium Mg ⁺⁺	6,08	
Sodium Na ⁺	12,51	
Potassium K ⁺		12
Ammonium NH ₄ ⁺	0,06	0,5
Fer Fe ⁺⁺		0,5
Fer total Fe ⁺⁺ , Fe ⁺⁺⁺	0,00	0,5
Manganèse Mn ⁺⁺		0,05
Aluminium Al ⁺⁺⁺		0,2

Substances toxiques	mg/l	V M A
Arsénics totaux As		0,05
Cyanures totaux Cn		0,005
Chromes totaux Cr		0,05

Date de prélèvement : 15-juil-10

Date de réception : 21-sept-10

Préleveur : CGC

Date d'analyse : 23-sept-10

Usage : AEP

Paramètres	Valeur	V M A N.M.
Dureté TH en °F	16,00	50
TH Ca, en °F	13,50	
Alcalinité TA, en °F	0,00	
TAC, en °F	14,30	
Chlore résiduel en mg/l		
M,O, mg O ₂ /l (alcalin)	0,00	2
(Acide)		5

Anions	mg/l	V M A N.M.
Carbonates CO ₃ ²⁻	0,00	
Bicarbonates HCO ₃ ⁻	174,46	
Chlorures Cl ⁻	28,40	250
Sulfates SO ₄ ²⁻	18,12	250
Nitrites NO ₂ ⁻	0,01	0,1
Nitrates NO ₃ ⁻	0,58	50
Phosphate PO ₄ ³⁻		5
Fluorures F ⁻		1,5
Hydroxyde OH ⁻	0,00	

VMA : Valeur maximale admissible pour eau potable (N.M.)

M.O. : matières organiques (Oxydabilité au KMnO₄)

l. : légèrement

°F : degré Français

N.M. : Norme Malgache

OBSERVATIONS :

Eau conforme à la norme.

27 septembre 2010

Antananarivo, le

Le Chef de Laboratoire, RB

RB

TABLE DES MATIERE

INTRODUCTION	1
PREMIERE PARTIE :	3
GENERALITES	3
I.1. LE PROJET PAEAR	3
I.1.1. Les objectifs	3
I.1.2. Les acteurs	4
I.1.3. Le projet PAEAR dans le Nord	4
I.2. DESCRIPTION DES TRAVAUX DE FORAGES	5
I.2.1. Travaux préparatoires.....	5
I.2.2. Procédés et méthode d'exécution.....	6
I.2.3. Séquence des opérations	6
DEXIEME PARTIE :	10
PRESENTATION	10
II.1. CONTEXTE ADMINISTRATIF.....	10
II.1.1. Contexte géographique.....	10
II.1.2. Contexte socio-économique	13
II.1.2.1. Milieu humain.....	13
II.1.2.2. Niveau d'instruction	13
II.1.2.3. Services sociaux.....	13
II.1.2.4. Secteur agricole	14
II.2. CONTEXTE PHYSIQUE.....	15
II.2.1. Relief et paysage	15
II.2.1.1. Les plateaux.....	15
II.2.1.2. La zone littorale.....	15
II.2.2. Géologie et les traits structuraux.....	16
II.2.3. Climat	20
II.2.3.1. Température	20
II.2.3.2. Pluviométrie	21
II.2.3.3. Vent	22
II.2.4. Hydrologie	22
II.2.5. Sols et végétations	24
II.2.5.1. Sols	24
II.2.5.2. Végétations	24
TROISIEME PARTIE :	26
ANALYSE	26
III.1. COUPES DE FORAGE ET COURBE DE POMPAGE	26
III.1.1. Suivant le profil AB	30

III.1.2. Suivant le profil CD.....	39
III.2. RESULTATS DE L'ANALYSE PHYSICO-CHIMIQUE FAITE PAR LE JIRAMA .	48
III.2.1. Les paramètres physiques	48
<i>III.2.1.1. Matières organiques (MO [mg/L])</i>	48
<i>III.2.1.2. Turbidité (Turb [NTU])</i>	48
<i>III.2.1.3. Température (T [°C])</i>	48
<i>III.2.1.4. Potentiel hydrogène (pH).....</i>	49
<i>III.2.1.5. Minéralisation totale : (TDS : Total Dissolved Salts [mg/L])</i>	49
<i>III.2.1.6. Conductivité de l'eau (CE [μS/cm])</i>	49
III.2.2. Les données chimiques.....	50
<i>III.2.2.1. Titre hydrotimétrique ou dureté totale (TH) et dureté calcique (TH Ca)</i>	51
<i>III.2.2.2. Titre Alcalimétrique Complet (TAC) et titre Alcalimétrique (TA)</i>	51
<i>III.2.2.3. Les anions</i>	51
<i>III.2.2.4. Les cations</i>	52
<i>III.2.2.5. Les composantes azotées</i>	53
III.2.3. Les données sous AquaChem	54
III.3. TRAITEMENTS ET INTERPRETATIONS	59
III.3.1. Représentation graphique	60
<i>III.3.1.1. Diagramme de Schoëller.....</i>	60
<i>III.3.1.2. Diagramme de Piper</i>	61
III.3.2. Interprétation des diagrammes	62
III.4. ESSAIS DE REGIONALISATION DES DONNEES	63
III.4.1. La conductivité électrique	64
III.4.2. Liaison calcium et magnésium	66
III.4.3. Liaison entre l'ion bicarbonate et l'ion magnésium.....	67
III.4.4. Liaison entre l'ion chlorure et l'ion sodium.....	68
Figure 34 : Comparaison entre la carte de chlore et sodium.....	68
III.4.1. Régionalisation des niveaux statiques	69
CONCLUSION.....	71

Titre de mémoire : CARACTERISATION HYDROGEOLOGIQUE ET HYDROCHIMIQUE
DES EAUX SOUTERRAINES DU DISTRICT DE MAINTIRANO

Nom : ANDRIANAIVO

Prénoms : Vololombero Sitrakinaina

Nombre de pages : 66

Tél : 033 12 650 10

Nombre de tableaux : 13

e-mail : sytrakynyayna@yahoo.fr

Nombre de figures : 35

RESUME

Le District de Maintirano de la Région de Melaky a bénéficié du le projet d'adduction en eau potable « 1250 forages ». Lors des 29 forages positifs effectués dans cette circonscription, nous avons collecté et traité les données scientifiques et techniques pour cette étude. Dans cette zone, on peut distinguer deux principaux types d'aquifère : l'aquifère constitué par du grès dans la partie Nord Est et celui du basalte ou gabbro pour la majorité des sites. D'une manière générale, les nappes sont captives.

Les analyses au laboratoire des eaux collectées ont été confiées à la JIRAMA. La compilation et le traitement des résultats nous prouvent que ces eaux ont la même origine : ce constat est explicite sur le diagramme de Schoëller et le diagramme de Piper nous indique deux principaux faciès.

Un essai de régionalisation des paramètres collectés nous indique la particularité de cette zone au point de vue hydrogéologique et chimique.

Mots-clés : aquifère, échantillon, qualité de l'eau, forage, faciès, Maintirano.

ABSTRACT

District Maintirano Region Melaky benefited from the proposed drinking water supply “1250 drills”. During the 29 positive drill made in that District, we collected and processed the scientific and technical data for this study. In this area there are two main types of aquifer: the aquifer consists of sandstones in the North and that of basalt or gabbro for most sites. In general, the layers are captives.

The laboratory analysis of water collected was transferred to JIRAMA. The compilation and processing of the results we show that these waters have same origin: this fact is explicit in the diagram of Schoëller and Piper diagram shows us two main facies.

A test of regionalization of the parameters we collected indicates the characteristic of this area in terms hydrogeological and chemical.

Keywords: aquifer sample, water quality, drilling, facies, Maintirano

Encadreur :

Docteur ROBISON Laurent Roger
Chercheur- Enseignant au CNRE